

---

СПРАВОЧНОЕ РУКОВОДСТВО  
ПО ВЫСОКОВОЛЬТНОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

ЯНВАРЬ 2022 г. РЕД. 8

## РАЗДЕЛ 1

### Часто задаваемые вопросы: ВИП и безопасность

#### Электрическая дуга/короткое замыкание

Имеется ли защита по току в источниках питания SPELLMAN?	1
Насколько важна установка в параметрах нагрузки частоты повторений короткого замыкания?	1
В чем различие между токами мгновенного и продолжительного короткого замыкания?	1
Почему дуговой разряд является проблемой в высоковольтных источниках питания?	1

#### Интерфейсы

Какие типы высоковольтных разъемов используются в источниках питания?	2
Можно ли управлять источником питания через компьютер?	2
Что имеется в виду, когда говорится, что большинство изделий поставляется с высоковольтным кабелем без концевого разъема?	2

#### Безопасность

Каков безопасный уровень высокого напряжения?	3
Где можно найти информацию по технике безопасности высоковольтных установок?	3
Что такое внешняя блокировка? Как ею пользоваться?	3
Стандарт IEEE 510-1983: Рекомендации по безопасному выполнению работ при проведении испытаний высоковольтных устройств и устройств большой мощности	3

#### Технология/терминология

В чем разница между источниками питания в модульном и стоечном исполнении?	5
В чем различие между режимами стабилизации напряжения и тока?	6
Что собой представляет стабилизация мощности, и где она может использоваться?	6
Что такое «плавающая земля»?	6
Что такое «твердая заливка»?	7
Почему в источниках используется масляная изоляция?	7
Что такое коронный разряд?	7
Что такое умножитель напряжения?	8
Что собой представляет резонансный инвертор?	8
Что такое высоковольтный источник питания?	8
Линейные и переключаемые источники питания	9
Почему в высоковольтных источниках питания используются коронирующие кольца/тороиды/шары?	10
Что такое высоковольтный источник питания последовательного («секционного») типа?	10
Что такое шариковая пайка?	10

#### Использование/применение

Положительная, отрицательная, обратимая полярности — насколько все это важно при покупке источника питания?	11
Можно ли эксплуатировать источник при максимальных значениях напряжения или тока? Каковы допустимые пределы отклонений параметров источника от номинальных?	11
Можно ли потреблять от источника удвоенный ток, если понизить выходное напряжение в два раза?	11
Почему время спада в источниках питания Spellman зависит от нагрузки?	11
Как следует заземлять источник питания?	11
Можно ли включать источник питания по схеме с «плавающей» землей?	12
Можно ли эксплуатировать источники питания с номинальным напряжением 220 В перем. тока при напряжении 230 В перем. тока?	12
Почему для источника питания следует предусматривать сигнал программирования тока?	12
Почему для использования ваших источников питания с целью зарядки конденсаторов необходимо заполнить анкету?	12
Какие возможности имеют высоковольтные делители напряжения серии HVD в отношении полос пропускания?	13

Что такое коэффициент мощности? Что такое коэффициент мощности импульсного источника питания?	13
Можно ли подключить высоковольтный источник питания, рассчитанный на работу от однофазной сети переменного тока 220 В, к трехфазной сети переменного тока 208 В?	13

## РАЗДЕЛ 2

### MONOBLOCK<sup>®</sup>. Охлаждение, прогрев и часто задаваемые вопросы

#### Рекомендации по охлаждению

#### Процедура прогрева

#### MONOBLOCK<sup>®</sup>. Часто задаваемые вопросы

Требуется ли поддерживать аппарат Monoblock <sup>®</sup> в охлажденном состоянии? Почему?	15
Какое периодическое техническое обслуживание необходимо выполнять для аппарата Monoblock <sup>®</sup> ?	15
Есть ли минимальные значения тока и напряжения, которые я могу задать в своем аппарате Monoblock <sup>®</sup> ? Почему?	15
Есть ли особые инструкции в отношении механического крепления аппарата Monoblock <sup>®</sup> ?	16
Как часто необходимо прогревать аппарат Monoblock <sup>®</sup> ? Почему?	16
Как стабильность дозы рентгеновского излучения соотносится с устойчивостью по напряжению/току?	16
Можно ли безопасно хранить аппарат без использования в течение продолжительного периода времени?	16
Будет ли рентгеновская трубка работать вечно?	16

## РАЗДЕЛ 3

### Указания по применению. ВИП

#### УП-01

Что означает выражение: выход с «привязкой к потенциалу земли»?	17
---	----

#### УП-02

«Заземление есть заземление», правильно? Скажем так: «Не всегда». Что же необходимо знать?	17
--	----

#### УП-03

Вы же не станете использовать кирку для лечения зубов: чрезмерное завышение технических характеристик источника питания может оказаться неразумным	17
--	----

#### УП-04

А где же нижний предел? Почему соотношение сигнал-шум важно при управлении высоковольтными источниками питания?	18
---	----

#### УП-05

«А теперь ты потрогай!» Разъяснения по поводу времени спада выходного напряжения высоковольтного источника питания и времени разряда	19
--	----

#### УП-06

«Просто закоротить внешнюю блокировку?» Почему так делать не стоит	19
--	----

#### УП-07

Чему равно максимально допустимое напряжение для коаксиального кабеля RG8-U?	20
--	----

#### УП-08

Как изменить полярность блока питания?	20
--	----

#### УП-09

Почему источникам питания требуется время для прогрева?	21
---	----

#### УП-10

Фиксированная полярность, реверсивная полярность, четырехквадрантный режим...	21
---	----

<b>УП-11</b>	Характеристики динамической нагрузки высоковольтного источника питания	22
<b>УП-12</b>	Преимущество использования источника тока для питания цепей накала рентгеновских трубок	23
<b>УП-13</b>	Схема защиты от возникновения дугового разряда и внешние последовательные ограничивающие резисторы	24
<b>УП-14</b>	Ограничения цифровых измерительных приборов передней панели	24
<b>УП-15</b>	Пояснение к 3,5- и 4,5-разрядным индикаторам измерительных приборов	25
<b>УП-16</b>	Возможности параллельной работы устройств серии ST	26
<b>УП-17</b>	Пояснение относительно разрешения настройки высоковольтных источников питания	26
<b>УП-18</b>	Токовая петля / схема обнаружения дугового разряда	27
<b>УП-19</b>	Чем короче, тем лучше: о длине кабелей высокого напряжения	28
<b>УП-20</b>	Заземление высокочастотных переходных токов, возникающих вследствие дуговых разрядов	29
<b>УП-21</b>	Как рассчитать максимальную силу переменного тока на входе	29
<b>УП-22</b>	Простое испытание режима стабилизации напряжения / тока высоковольтного источника питания	30
<b>УП-23</b>	Пояснение схемы SL ВН ВыКЛ и ВН ВКЛ	32
<b>УП-24</b>	Экологические аспекты высоковольтных источников питания Spellman, рентгеновских генераторов и источников питания рентгеновского излучения Monoblock <sup>®</sup>	32
<b>УП-25</b>	Высоковольтный источник питания искрит. Как выяснить, в чем проблема?	33
<b>УП-26</b>	Зарядка конденсаторов и высоковольтные источники питания Spellman	34
<b>УП-27</b>	Что означает неисправность «ошибка стабилизации»?	35
<b>УП-28</b>	Импульсные устройства и высоковольтные источники питания Spellman	36

**РАЗДЕЛ 4**
*Указания по применению. Рентгеновские генераторы*

<b>УП-01</b>	Основные принципы работы рентгеновского генератора — оптимизация рентгеновской трубки	37
	Основные сведения по совмещению настроек рентгеновского генератора и рентгеновской трубки	37
	Зависимость нагрева от длины кабеля	37

<b>УП-02</b>	Распространенные виды неисправностей рентгеновских трубок	39
	Производственные дефекты	42
	Несоответствие области применения	44
	Ненадлежащая работа с источником питания	44
	Особенности кожуха трубки	47
<b>УП-03</b>	Рентгеновские генераторы с плавающей нитью накала и возможные проблемы, которые могут создавать длинные высоковольтные кабели	48

**РАЗДЕЛ 5 Технические статьи о высоковольтных источниках питания и высоковольтной электронике**
**Использование и применение источника питания**

Стандарт IEEE 510-1983. Рекомендации IEEE по безопасному выполнению работ при испытании высоковольтных устройств и устройств большой мощности	50
Стандартные методики испытания для высоковольтных источников питания	52
Описание высоковольтных источников питания	58
Высоковольтные источники питания для аналитической аппаратуры	63
Использование высоковольтных источников питания для создания электростатического поля	68
Процесс разработки продукции для высоковольтных источников питания	72
Следующее поколение оборудования подачи энергии (ОПЭ)	76
Технология высоковольтных источников питания для использования в электроснабжении	80
Функциональная роль рентгеновских генераторов	83

**РАЗДЕЛ 6 Технические статьи о высоковольтных источниках питания и высоковольтной электронике**
**Научные статьи**

Проектирование и испытание импульсной нагрузки высокой мощности	92
Точные измерения потерь силовых полупроводниковых приборов в открытом состоянии	97
Высокоэффективный источник питания с режимом переключения 100 кВ, 100 кВт для электростатических фильтров (ЭФ)	102
Концепция и разработка высоковольтного высокопроизводительного недорогого устройства для зарядки конденсаторов	108
Сравнительные испытания простых концов высоковольтных кабелей	122
Высоковольтный источник питания большой мощности для применений с импульсами большой длительности	131
Сравнение электрической прочности трансформаторного масла при напряжении постоянного тока и повторяющихся импульсах с длительностью до нескольких миллисекунд	139
Поведение высоковольтного кабеля источника питания при коротком замыкании и связанные явления. Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE). Труды по диэлектрикам и электрической изоляции	149
Анализ распределения электрического поля в неидеальной изоляции при постоянном токе	156

**РАЗДЕЛ 7**
*Тематический словарь*
**РАЗДЕЛ 8**
*Словарь технических терминов*
**РАЗДЕЛ 9**
*Словарь рентгенографических терминов*

**ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ:  
ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ****ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА/КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ****Имеется ли защита по току в источниках питания SPELLMAN?**

Практически все источники питания Spellman, за исключением нескольких модульных источников с пропорциональным управлением, имеют токовую защиту, выполненную с использованием контура стабилизации по току (режим стабилизации тока).

Настройка режима на заданное значение тока производится с передней панели или дистанционно — управляющим токовым сигналом. Обратная связь по току вырабатывается внутри самого источника по сигналам с токочувствительного элемента (если таковой имеется) и управляющей дистанционной цепи. Ограничение тока или его стабилизация на заданном уровне осуществляется путем сравнения сигнала ОС с управляющим токовым сигналом. В режиме стабилизации тока выходной ток источника ограничивается до заданного уровня даже в случае продолжительного короткого замыкания на выходе.

**Насколько важна установка в параметрах нагрузки частоты повторений короткого замыкания?**

В некоторых случаях частота коротких замыканий является весьма важным параметром, который следует учитывать при выборе источника питания.

Исходя из практического опыта, большинство источников питания Spellman рассчитаны на максимальную частоту

коротких замыканий, равную примерно 1 Гц. Это значение определяется величиной запасаемой энергии в выходном каскаде источника и мощностными параметрами выходного резистивного ограничителя, ограничивающего пиковый разрядный ток при коротком замыкании. Данный ограничитель, удерживающий мгновенное значение тока на определенном уровне, во время короткого замыкания рассеивает запасаемую энергию, превращая ее в тепло. Однако если частота пробоев становится выше значения, предусмотренного техническими характеристиками, то ограничитель может выйти из строя вследствие перегрева. Источник выдерживает короткие (частые) серии интенсивных пробоев при условии, что частота коротких замыканий не превышает 1 Гц.

Возможна модификация источника в целях повышения частоты повторения короткого замыкания путем снижения его внутренней емкости и (или) повышения его допустимой мощности. По этому поводу просьба обращаться в департамент продаж Spellman.

**В чем различие между токами мгновенного и продолжительного короткого замыкания?**

Выход источника питания является емкостным, т. е. способным запасать энергию. При коротком замыкании на выходе происходит разряд конденсаторов в множителе напряжения, причем единственным ограничивающим элементом в цепи разряда является последовательное балластное сопротивление. Все источники Spellman имеют встроенный

выходной ограничитель, удерживающий мгновенное значение тока на заданном уровне, который определяется отношением выходного напряжения к сопротивлению, последовательно включенному в цепь разряда. Продолжительность и скорость затухания разряда определяются величиной емкости и сопротивления цепи разряда.

Если выход источника оказывается закороченным, то этот тип короткого замыкания относится к мгновенному типу.

После завершения разряда выходной емкости ток может поступить только с силовых цепей самого источника питания. В этом случае источник питания обнаруживает нарастание выходного тока вследствие короткого замыкания и автоматически переходит в режим стабилизации по току. При этом выходной ток стабилизируется на заданном уровне.

Таким образом, мгновенный ток короткого замыкания представляет собой импульс, разряжающий конденсаторы источника питания, а продолжительный ток короткого замыкания — ток заданного ограниченного уровня, который поддерживается в режиме стабилизации по току.

**Почему дуговой разряд является проблемой в высоковольтных источниках питания?**

Конструкция высоковольтных источников питания Spellman позволяет выдерживать дуговые разряды. Отдельные или кратковременные дуговые разряды не вызывают проблем, однако постоянное и долговременное действие электрической дуги приводит к перегреву ограничителя выходного напряжения.

Секции высоковольтного выхода Spellman являются емкостными по типу. Для ограничения тока дугового разряда к выходу источника питания последовательно подключается ограничительная цепь. Ее сопротивление ограничивает ток дугового разряда на безопасном и предсказуемом уровне.

В емкостной секции высоковольтного выхода накапливается энергия, равная  $\frac{1}{2} CU^2$  Дж, где  $C$  — емкость конденсатора, а  $U$  — выходное напряжение. При возникновении дугового разряда накопленная таким образом энергия рассеивается в виде тепла в блоке ограничителя выходного напряжения. При отдельных или кратковременных дуговых разрядах тепловая энергия рассеивается, однако постоянное и долговременное действие электрической дуги может вызвать перегрев ограничителя выходного напряжения.

Некоторые устройства Spellman оснащены схемой защиты от дугового разряда которая обнаруживает и гасит его с целью предотвратить ущерб от долговременного воздействия электрической дуги. Такими схемами оснащены не все устройства, поэтому долговременное воздействие дугового разряда может привести к перегреву ограничителя выходного напряжения и непоправимым повреждениям источника питания.

Если в ваших условиях эксплуатации возможны долговременные воздействия дуговых разрядов, обратитесь в Spellman для пересмотра технических условий для вашего оборудования. Возможно, мы сможем предложить вам адаптированное к вашим потребностям устройство с повышенной устойчивостью к дуговым разрядам.

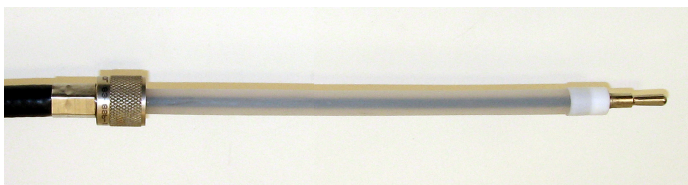
**ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ:  
ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ****ИНТЕРФЕЙСЫ****Какие типы высоковольтных разъемов используются в источниках питания?**

В большинстве источников Spellman используются один или два типа высоковольтных разъемов (кабелей), однако возможна установка и других типов — стандартных (Alden, Lemo, Kings и др.) или по условиям заказчика.

Во многих модульных источниках питания вывод выполнен по типу высоковольтного микрокабеля, длина и тип которого соответствуют номиналу выходного напряжения, и который неразрывно соединен с источником. В зависимости от модели, кабель может быть с экраном или без него. Стандартные кабели имеют фиксированную длину; возможна поставка изделий с длиной кабеля по заказу.

Большинство приборов, рассчитанных на более высокую мощность, поставляются с кабелями, разработанными и изготовленными Spellman, — это съемные высоковольтные коммутационные конструкции (кабель/разъем), известные также под названием дерлиновых (т. е. на основе полиформальдегида) разъемов. В типовом исполнении глубоко утопленный гнездовой разъем располагается в источнике, а к нему подключается ответная часть, состоящая из коаксиального полиэтиленового кабеля и разъема. На участке кабеля ПВХ-оболочка и экранирующая оплетка сняты, полиэтиленовая изоляция оголена. Длина оголенной части зависит от номинала напряжения источника. На конце кабеля к центру проводника прикреплена вилка с подпружиненными контактами, а для заделки оголенной части на ее конце встроена модифицированная оболочка УВЧ- или MS-разъема. Этим обеспечивается простое и надежное высоковольтное соединение. Кабель легко присоединяется к прибору и так же легко отсоединяется от него.

Ниже на рисунке показан стандартный съемный высоковольтный кабель. По поводу высоковольтных кабелей и разъемов специального и пользовательского исполнения просим обращаться в департамент продаж Spellman.



Стандартный съемный высоковольтный кабель

**Можно ли управлять источником питания через компьютер?**

Да, источники питания Spellman могут настраиваться и управляться с помощью компьютера.

Большинство новых устройств Spellman поставляются в комплекте с интегрированной опцией «стандартизированные средства управления» (SiC), которая обеспечивает

возможность программирования устройства через протоколы RS-232, Ethernet или USB.

Многие наши стандартные продукты не имеют по ведомости опции «стандартизированные средства управления», но в некоторых случаях могут быть модифицированы для возможности ее дополнения. Обратитесь за подробной информацией в отдел продаж.

Управление с ПК возможно даже для оборудования, не комплектуемого «стандартизированными средствами управления».

Практически все наши изделия можно регулировать дистанционно с помощью сигналов, посылаемых относительно уровня земли. Как правило, изменение управляющего сигнала от 0 до 10 В вызывает изменение выходного параметра (тока или напряжения) от нуля до максимального значения. Выходы сигналов контроля напряжения и тока реализуются аналогичным образом. Внешние сигналы запрета, а также сигналы HV ON (высокое напряжение включить) и HV OFF (высокое напряжение отключить) формируются в стандарте TTL с нулевым уровнем, привязанным к земле, или с помощью группы открытых/закрытых контактов сухого типа. Более подробно эти вопросы изложены в инструкции на изделие.

**Что имеется в виду, когда говорится, что большинство изделий поставляется с высоковольтным кабелем без концевого разъема?**

В компании Spellman, как правило, с разъемами высоковольтных источников питания используется не съемный (встроенный) или съемный выходной кабель высокого напряжения. Не съемный кабель механически связан с устройством, что делает невозможным его замену. Съемные выходные кабели высокого напряжения при необходимости можно легко заменить.

При этом и со встроенным выходным кабелем, и со съемным выходным кабелем высокого напряжения «нагрузочный конец» или «конец заказчика» высоковольтного кабеля обычно поставляется без концевого разъема. Это означает, что у высоковольтного кабеля нет конкретного разъема для подключения. В компании Spellman конец кабеля обрезается, а кожух, экран (при наличии) и первичный слой изоляции удаляются, примерно на один дюйм оголяя центральную жилу.

Наши источники питания используются в многочисленных областях, где к высоковольтным соединениям применяются различные электротехнические требования. Поэтому Spellman оставляет за заказчиком выбор и изготовление выходного разъема высоковольтного кабеля согласно требованиям соответствующей области применения.

В Spellman часто используется фирменный глубокий (утопленный) цилиндрический разъем, предназначенный для коаксиальных выходных кабелей высокого напряжения со стороны источника питания. Вот уже несколько лет в разговорной речи мы называем этот разъем дерлиновым, поскольку первые такие разъемы были созданы из термoplastика Delrin от компании DuPont.

Spellman не предоставляет и не предлагает к покупке фирменный утопленный цилиндрический разъем. Стандартный дерлиновый разъем сам по себе не обладает какой-либо

## ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ: ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ

устойчивостью к высокому напряжению. Он становится полноценным высоковольтным разъемом с достаточной изоляцией высокого напряжения только при условии его встраивания в подходящую конструкцию квалифицированным инженером по разработке высоковольтных систем, и обеспечения надлежащих зазоров, расстояний, Фаррадеевской экранировкой и силиконовой герметизацией.

которого можно разместить на панели высокого напряжения. Если панель по небрежности оказалась открытой, высокое напряжение будет отключено; это в значительной степени снижает риск травматизма. Spellman настоятельно рекомендует по возможности чаще прибегать к использованию цепей блокировки.

### БЕЗОПАСНОСТЬ

#### Каков безопасный уровень высокого напряжения?

Вопросы безопасности имеют абсолютный приоритет в любой высоковольтной продукции Spellman. Для обеспечения максимального уровня безопасности, как персонала фирмы, так и заказчика, мы исходим из принципа, что «безопасного» уровня высокого напряжения не существует. С этой точки зрения мы рассматриваем любую ситуацию, связанную с наличием высокого напряжения, как опасную и представляющую угрозу для жизни.

Настоятельно рекомендуем использовать защитные клетки Фарадея, средства блокировки доступа к любым панелям, где может оказаться высокое напряжение, пользоваться заземленными стержнями для разряда высоковольтных источников, внешними цепями блокировки, избегать прикосновения к любым частям схемы, имеющим даже малейшую возможность контакта с высоким напряжением. Строгое соблюдение всех правил техники безопасности является наилучшей гарантией безопасной работы.

#### Где можно найти информацию по технике безопасности высоковольтных установок?

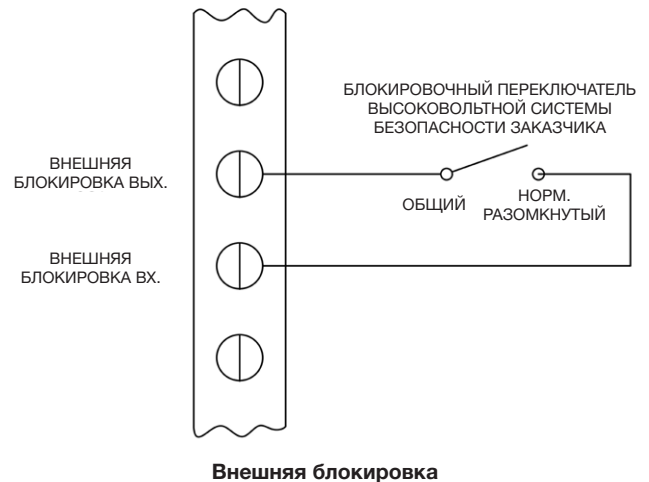
Наиболее полно техника безопасности при работе с высокими напряжениями представлена в извлечении из стандарта IEEE 510-1983, известного под названием «Руководящие указания по безопасности при испытаниях высоковольтного и силового оборудования» (The IEEE Recommended Practices for Safety in High Voltage and High Power Testing), копию которого можно запросить в департаменте продаж Spellman.

#### Что такое внешняя блокировка? Как ею пользоваться?

Внешняя блокировка представляет собой цепочку, предназначенную для использования в условиях заказчика. Большинство таких цепей имеет две клеммы, расположенные на пользовательском разьеме. Для перевода источника в состояние «высокое напряжение включено» необходимо замкнуть эти две точки. Настоятельно рекомендуется коммутировать их с помощью отказоустойчивых электромеханических элементов (переключателей, контакторов, реле), а не полупроводниковых (транзисторных) компонентов. Если в момент разрыва соединения между указанными точками источник находился в состоянии «высокое напряжение включено» (HV ON), то он перейдет в режим «высокое напряжение отключено» (HV OFF).

С помощью этой простой цепочки можно подключить к источнику внешнее устройство блокировки, контактные элементы

ТИПИЧНАЯ ЗАДНЯЯ ПАНЕЛЬ



Внешняя блокировка

#### Стандарт IEEE 510-1983: Рекомендации по безопасному выполнению работ при проведении испытаний высоковольтных устройств и устройств большой мощности

разработка:

Институт инженеров по электротехнике и электронике

#### СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ

В данном разделе приведены выдержки из стандарта IEEE 510-1983 с указаниями по мерам предосторожности, которые необходимо предпринимать персоналу, работающему с высоковольтной аппаратурой и выполняющему измерения высокого напряжения, а также представлены рекомендации по технике безопасности для снижения рисков, связанных с использованием электроэнергии.

Рекомендации по правилам техники безопасности при испытании электрооборудования касаются не только персонала, но и к испытываемому оборудованию, аппаратуры или системы. Эти практические рекомендации, как правило, направлены на обеспечение безопасности при проведении лабораторных испытаний с использованием высокого напряжения, а также при испытании систем со встроенными высоковольтными источниками питания и т. д. В рамках данных практических рекомендаций в качестве фактического минимума для указанных типов испытаний было принято напряжение, равное приблизительно 1000 В. В тех случаях, когда речь идет о более низком напряжении или при наличии особых рисков, решение о применимости данных практических рекомендаций необходимо принимать с учетом индивидуальных условий конкретной ситуации.

**ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ:  
ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ****БЕЗОПАСНОСТЬ (продолжение)**

1. Следует считать, что все незаземленные выводы испытательного стенда или испытываемой аппаратуры находятся под напряжением.
2. Испытательный стенд и испытываемый образец должны быть надежно подключены к общей линии заземления. Пропускная способность по току заземляющих проводов должна, как минимум, превышать токовую нагрузку, возникающую при отводе максимально возможного тока заземления. При этом необходимо учитывать эффект возрастания потенциала земли вследствие наличия активного и реактивного сопротивления подключения на землю.
3. Должны быть приняты меры предосторожности для предотвращения случайного контакта персонала с выводами, находящимися под напряжением. Такими мерами могут служить либо экранирование этих выводов, либо установка защитных ограждений вокруг опасной зоны.
4. В схему должны входить контрольно-измерительные приборы для индикации величины напряжений, используемых при испытании.
5. В целях безопасности необходимо предусмотреть наличие соответствующих средств коммутации или, если это целесообразно, присутствие наблюдателя для немедленного обесточивания испытательных схем. При проведении испытаний с использованием постоянного тока необходимо принять меры для сброса заряда и заземления выводов, находящихся под напряжением, а также предусмотреть дополнительную изоляцию.
6. Испытания высоковольтного оборудования и оборудования большой мощности, а также надзор за их проведением должны осуществляться квалифицированным персоналом.

**ПРАВИЛА ТБ В ЗОНЕ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ**

1. На входных дверях или около них должны быть установлены предупреждающие знаки, например «ОПАСНО — ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ».
2. В той мере, насколько это практически реализуемо, необходимо предусмотреть устройства автоматического заземления для визуально заметного подключения «земли» к высоковольтным цепям после того, как они будут обесточены. В некоторых высоковольтных цепях, особенно в тех, элементы которых переключаются от одной установки на другую, это может быть нецелесообразно. В таких случаях оператор должен присоединять «землю» к высоковольтному выводу с помощью надежно изолированной рукоятки. При использовании нескольких конденсаторов, соединенных последовательно, не всегда хватает подключения к системе заземления одного высоковольтного вывода. Также должны быть заземлены промежуточные выводы, не имеющие защиты. В первую очередь это относится к импульсным генераторам, конденсаторы которых

должны быть замкнуты накоротко и иметь заземление до начала и во время работы генератора.

3. Защитное заземление контрольно-измерительных приборов (КИП) должно иметь приоритет перед надлежащим заземлением сигнальных контуров, если не были приняты иные меры, обеспечивающие безопасность персонала.

**ЦЕПИ УПРАВЛЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ**

Провода из зоны испытаний должны прокладываться в заземленной металлической оплетке, с присоединением к заземленному металлическому корпусу. Если это требование не выполняется, то должны быть приняты иные меры, обеспечивающие безопасность персонала. В эту категорию попадает проводка цепей управления, подключения к измерительным приборам, а также кабели, подключаемые к осциллографам. Как правило, измерительные приборы и другие средства КИП с доступными для прикосновения выводами размещаются в металлическом отсеке со смотровым окном.

**Временные цепи**

1. Временные измерительные цепи должны быть полностью размещены в зоне проведения испытаний и должны хорошо просматриваться через ограждение. Как альтернативный вариант, измерительные приборы могут располагаться за пределами ограждения при условии, что и сами приборы, и проводка за пределами зоны испытаний будут заключены в заземленные металлические кожухи.
2. С временными цепями управления следует обращаться так же, как с измерительными цепями, то есть они должны быть размещены в заземленном корпусе, а все элементы управления, находящиеся в зоне доступа оператора, должны иметь потенциал земли.

**ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ**

Для лабораторий и испытательных станций следует разработать и обеспечить исполнение свода правил по технике безопасности (ТБ). С каждым сотрудником, назначенным для обслуживания испытательной зоны, должен быть проведен соответствующий инструктаж с предоставлением ему копии правил по технике безопасности. Необходимо выработать и выполнять процедуру периодического анализа этих правил совместно с операторами.

**ПРОВЕРКА СОБЛЮДЕНИЯ ПРАВИЛ  
ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ**

Необходимо выработать порядок периодического инспектирования испытательных зон и его практического исполнения. По выводам, полученным в результате этих инспекционных проверок, следует реализовывать корректирующие мероприятия в отношении опасного оборудования или практических методов работы, которые не соответствуют предъявляемым требованиям и нормам.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** Принцип формирования комиссии по технике безопасности из нескольких операторов с регулярной ротацией доказал свою

**ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ:  
ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ****БЕЗОПАСНОСТЬ (продолжение)**

эффективность не только с точки зрения реализации контроля, но и при разъяснении важности соблюдения правил ТБ всему персоналу.

**ЗАЗЕМЛЕНИЕ И ЗАКОРАЧИВАНИЕ**

1. Прокладка и подключение временной проводки должны выполняться таким образом, чтобы при ее случайном обрыве не создавались угрозы для персонала или оборудования.
2. Устройства, для изоляции которых применяется твердый или жидкий диэлектрик, при простое желателно заземлять и замыкать накоротко.
3. Для обеспечения надлежащей безопасности необходимо, чтобы емкостные элементы были замкнуты накоротко в следующих ситуациях:
4. У любого неиспользуемого емкостного элемента, на который может оказать влияние электрическое поле постоянного тока, незащищенный высоковольтный вывод должен быть заземлен. Несоблюдение этой меры предосторожности может привести к возникновению напряжения в емкостном элементе вследствие воздействия электрического поля.
5. Емкостные элементы с твердым диэлектриком после контрольного испытания постоянным током должны быть замкнуты накоротко. Несоблюдение этой меры предосторожности может привести к возникновению в таком элементе напряжения вследствие отдачи от диэлектрической абсорбции, которое сохранится до тех пор, пока элемент не будет повторно подключен к цепи.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** Все неиспользуемые емкостные приборы рекомендуется оставлять в короткозамкнутом состоянии.

6. Любые емкостные приборы в составе разомкнутой цепи должны быть замкнуты накоротко и заземлены до того, как к ним будет прикасаться персонал.

**РАСПОЛОЖЕНИЕ**

1. Все объекты с потенциалом земли должны быть удалены от незащищенных точек с высоким напряжением на расстоянии не менее 1 дюйма (25,4 мм) на каждые 7500 В, т.е. для напряжения в 50 кВ потребуется расстояние не менее 6,7 дюйма (171 мм).
2. Для изоляторов, контактирующих с точками высокого напряжения, длина пути тока утечки должна составлять 1 дюйм (25,4 мм) на каждые 7500 В.

**ИСПЫТАНИЕ ПРИ ВЫСОКОМ УРОВНЕ МОЩНОСТИ**

1. К испытаниям при большом уровне мощности относится специальный тип высоковольтных измерений при очень большом токе. Вследствие этого во время испытаний при высоком уровне мощности необходимо еще более тщательно соблюдать меры безопасности. Возможность

взрыва испытуемого образца требует особого внимания при обеспечении безопасности работы в лаборатории.

2. Персонал, проводящий испытания при высокой мощности, или наблюдающий за ними, должен всегда использовать защитное снаряжение для глаз и лица в ситуациях, когда высока вероятность их поражения без использования такого снаряжения.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** К типичным факторам риска для глаз и лица в зоне испытаний при высокой мощности относятся интенсивный свет (включая ультрафиолетовое излучение), искры и расплавленный металл.

3. Персонал, наблюдающий за проведением испытаний при высокой мощности, на случай неожиданного появления электрической дуги должен носить защитные очки со стеклами, поглощающими вредное излучение. Линзы очков должны быть ударопрочными и иметь такую степень затемнения, которая соответствует уровню освещенности в рабочей зоне, и при этом обеспечивает защиту от опасного излучения, возникающего в случае неожиданного появления электрической дуги.

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

1. Все высоковольтное оборудование должно иметь общий и легкодоступный выключатель для отключения в экстренных ситуациях.
2. На любом высоковольтном оборудовании должны быть установлены индикаторы, сигнализирующие о наличии высокого напряжения на выходе.
3. На любом высоковольтном оборудовании должны быть предусмотрены внешние соединения (блокировка), при размыкании которых будет отключаться источник высокого напряжения. Такие соединения могут быть использованы для реализации защитной блокировки в ограждениях или для подключения защитного выключателя, активируемого рукой или ногой.
4. Конструкция любого элемента высоковольтного испытательного оборудования должна быть спроектирована с учетом анализа отказов. При этом следует определить, создаст ли отказ какой-либо части цепи или испытательного образца, который к ней подключен, опасную ситуацию для оператора. При анализе серьезных отказов должна учитываться вероятность отказа элементов, в которых вследствие такого отказа могут возникнуть избыточные нагрузки. Такой анализ может ограничиваться влиянием одного серьезного отказа в любой данный момент времени при условии, что такой отказ очевиден для оператора.

**ТЕХНОЛОГИЯ/ТЕРМИНОЛОГИЯ*****В чем разница между источниками питания в модульном и стоечном исполнении?***

Источники модульного и стоечного типа — две основные категории, в которые попадают практически все изделия Spellman. Данная унификация существенно облегчает процесс систематизации аппаратуры. Кроме того, Spellman выпускает источники питания в соответствии с требованиями



**ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ:  
ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ****ТЕХНОЛОГИЯ/ТЕРМИНОЛОГИЯ (продолжение)**

заказчика (custom supply) и источники питания под торговой маркой заказчика в OEM-исполнении, которые не подпадают под вышеуказанные категории.

Обычно стоечные приборы рассчитаны на более высокую мощность, чем их модульные аналоги, однако это не является правилом. Стоежные изделия в основном работают в резервном режиме с сетевым напряжением на входе. Как правило, они имеют полностью автономную переднюю панель с полным набором регулировок, обеспечивающих быстрое и легкое управление. Стоежные источники Spellman совместимы со стандартом стоечного монтажа EIA RS-310C.

Модульные источники выполнены в корпусах из тонкого металлического листа; обычно они имеют меньшую мощность — десятки-сотни ватт. Модульные источники обычно могут запитываться как от входного напряжения переменного тока (AC), так и от входного напряжения постоянного тока (DC). Источники питания под торговой маркой заказчика (OEM) часто изготавливаются упрощенными без сложных систем управления и контроля, что позволяет снизить их стоимость. Работа с прибором, его настройка и регулировка обычно выполняются с помощью сигналов, которые организуются пользователем через разъем дистанционного управления.

В тех случаях, когда требуется гибкость и простота управления (например, в лабораторных условиях), следует отдать предпочтение стоечным источникам питания. Модульные приборы находят все больший спрос у OEM-заказчиков, когда в специфических условиях эксплуатации требуется максимальная компактность при невысокой стоимости. Однако это скорее тенденция, а не закономерность.



Модульное исполнение

Стоежное исполнение

**В чем различие между режимами стабилизации напряжения и тока?**

Режимы стабилизации по току и напряжению — два способа управления выходом источника питания. В большинстве случаев от источника питания требуется, чтобы он был именно источником напряжения и удерживал выходное напряжение на постоянном уровне в то время, когда ток изменяется от нуля до максимального (по паспорту) значения. Такой источник работает в режиме стабилизации выходного напряжения, обеспечивая ток, необходимый по условиям нагрузки. Источник напряжения — это по своей сути источник питания с низким выходным сопротивлением.

Сходным образом работает источник и в токовом режиме, с той разницей, что в этом случае стабилизируется выходной ток. При этом обеспечивается весь диапазон напряжений, которые диктуются условиями нагрузки, в том числе и короткого замыкания. В данном случае прибор функционирует как источник тока, т. е. источник питания с высоким выходным сопротивлением.

Оба режима обеспечивают непрерывное регулирование выходного параметра источника, однако в одно и то же время может функционировать только один из них. Режимы реализуются с помощью быстродействующих управляющих схем, так что автоматическое переключение режимов является неотъемлемым свойством источника питания. Пользователь имеет возможность установить уровни стабилизации тока и напряжения, благодаря чему оказывается возможным контроль максимальных значений напряжений и тока во всем диапазоне рабочих условий.

**Что собой представляет стабилизация мощности, и где она может использоваться?**

Стабилизация мощности (или обратная связь по мощности, контур стабилизации мощности) — это третий режим стабилизации, который можно организовать в источниках питания Spellman в целях дополнительной регулировки и стабилизации выхода. В большинстве устройств основными режимами являются стабилизация выходного напряжения или стабилизация тока. Взяв в качестве управляющих сигналов напряжение и ток, пропорциональные их выходным значениям, и подав их на схему умножения, получим сигнал обратной связи по мощности (напряжение  $\times$  ток = мощность). Для замыкания контура обратной связи управления мощностью нужно подать этот сигнал на один из входов разностного усилителя, а на другой вход — опорный сигнал.

Стабилизация мощности обычно используется в двух случаях. Наименее распространенным является вариант, когда стабилизируемым параметром является мощность, подаваемая в нагрузку. Например, вследствие критических тепловых условий может потребоваться стабилизация теплового режима. Пользуясь функцией стабилизации мощности, можно задать пределы тока и напряжения такими, чтобы мощность в нагрузке оставалась постоянной, вне зависимости от импеданса самой нагрузки.

Более распространенный случай применения данного режима — это когда при заданном ограничении на мощность от источника электроэнергии отбирается (или нагрузкой потребляется) более высокий ток при пониженном напряжении. Такая ситуация часто возникает в рентгеновских трубках, когда возросшая способность токопотребления ведет к увеличению максимального напряжения, что может привести к повышению мощности в нагрузке свыше номинального значения. Пользуясь режимом стабилизации мощности, можно решить эту проблему, ограничив мощность на номинальном или заданном уровне.

**Что такое «плавающая земля»?**

В данном случае термин «плавающая земля» (FG) относится к опции, в которой обеспечиваются прецизионные измерения тока нагрузки относительно земли.

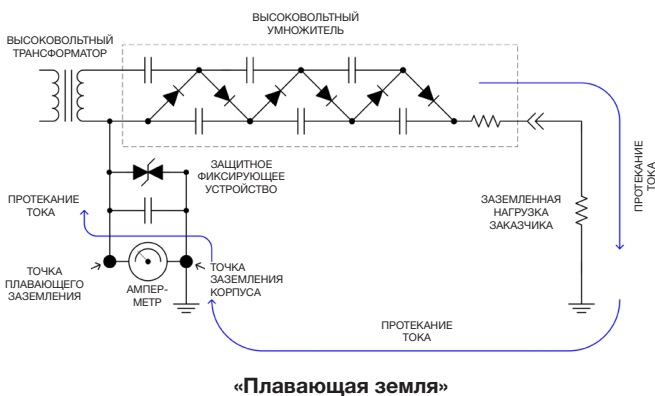
**ТЕХНОЛОГИЯ/ТЕРМИНОЛОГИЯ (продолжение)**

Любой ток, вытекающий с высоковольтного выхода источника, должен вернуться по обратному (нулевому) проводу к высоковольтной секции источника.

В опции FG все аналоговые земляные шины внутри прибора изолированы друг от друга и выведены на общую точку (FG) в тыльной части источника питания. Если между этой точкой и шасси прибора подключить амперметр, то таким способом можно измерить обратный ток высокого напряжения. Метод является безопасным и имеет привязку к земле.

По сути, потенциалы внутренних земляных шин «плавают» на уровне нескольких вольт, что и позволяет проводить подобные измерения. Данная опция предназначена только для токовых измерений относительно опорного уровня земли, поэтому реально максимальные значения плавающих внутренних («земляных») потенциалов обычно не превышают 10 В.

Важно отметить, что потенциалы всех цепей управления и контроля привязаны к верхнему уровню напряжения, который присутствует на клемме FG. Пользователь должен обеспечить полную изоляцию данной клеммы от шасси. В зависимости от модели источника возможны и более высокие уровни напряжения. За подробностями просим обращаться в департамент продаж Spellman.



**Что такое «твердая заливка»?**

Твердая заливка (заливка компаундом, «potting») — заливка изоляционным компаундом, который используется в производстве многих изделий Spellman. На выходе высоковольтного источника присутствует весьма высокое напряжение, поэтому конструкция выходного каскада имеет первостепенную важность для надежности и функциональных свойств изделия.

Твердая заливка на предприятиях Spellman позволяет миниатюризировать источники питания в такой степени, которая недостижима для технологии, при которой единственной изолирующей средой является воздух. В итоге получается более высокая плотность мощности, что позволяет создавать более компактные источники питания с меньшими размерами.

Кроме того, твердая заливка позволяет изолировать выходную высоковольтную секцию от воздействий окружающей среды, таких как пыль, загрязненность, влажность и вибрация. Это особенно важно для изделий, которые эксплуатируются в жестких окружающих условиях или без возможности выполнения технического обслуживания.

**Почему в источниках используется масляная изоляция?**

Spellman активно разрабатывает и применяет технологии масляной изоляции, тем самым обеспечивая своих разработчиков и инженеров дополнительными методами компоновки высоковольтной аппаратуры. В некоторых ситуациях масло, как изолирующая среда, обладает определенными преимуществами. Эти преимущества реализованы в проекте Spellman (MONOBLOCK®), где требовалось источник питания и рентгеновскую трубку выполнить в виде единого блока. В результате удалось снизить габариты и вес при отличных показателях отвода тепла, а также сократить затраты на высоковольтные кабели и разъемы.

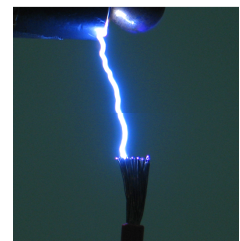
**Что такое коронный разряд?**

Коронный разряд (корона) — это электрический разряд со световыми и шумовыми эффектами, возникающий в условиях высокого градиента электрического потенциала, вызывающего ионизацию воздуха или (в определенных случаях) электрический пробой. Для короны характерно окрашенное свечение, хорошо заметное в условиях затемнения. Звуковой эффект (чаще всего слабое шипение) усиливается с ростом выходного напряжения. Явление сопровождается запахом озона — нестабильной формы кислорода, которая часто выделяется при разрядах. Озон оказывает разрушительное действие на резину, а при повышенной влажности возможно образование азотной кислоты. Эти факторы являются губительными для материалов, включая изоляторы.

При разработке качественной высоковольтной аппаратуры обязательно учитывается возможность появления коронных разрядов, при этом принимаются контрмеры для устранения возможных проблем. В Spellman для моделирования электрических полей используется наукоемкое программное обеспечение, а также детекторы частичного разряда (Biddle Partial Discharge Detector), что позволяет предупредить появление anomalно высоких градиентов напряженности поля и избежать частичных разрядов и коронирования.



Корона



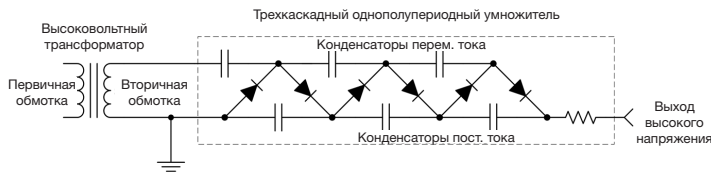
Коронный разряд

## ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ: ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ

### ТЕХНОЛОГИЯ/ТЕРМИНОЛОГИЯ (продолжение)

#### Что такое умножитель напряжения?

Умножитель напряжения часто используется для создания высокого напряжения постоянного тока; его схема включает в себя конденсаторы и выпрямительные диоды. Принцип действия умножителя состоит в том, что в течение нескольких периодов входного переменного напряжения происходит заряд конденсаторов по параллельной цепочке, в результате чего в последовательной цепи формируется суммарное постоянное напряжение, превышающее амплитуду напряжения источника. Отдельные умножители (frequently called stages) могут каскадироваться, и таким образом можно получить еще более высокое выходное напряжение.



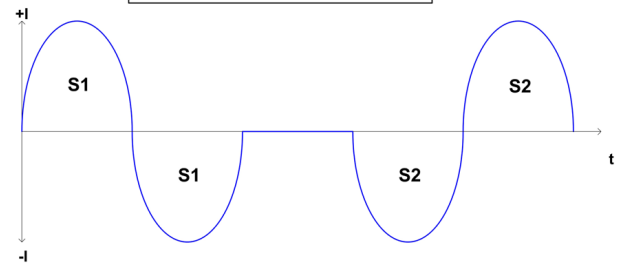
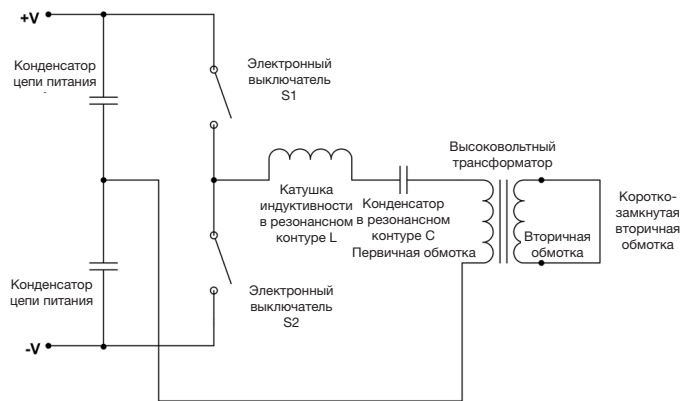
Умножитель ВН

Spellman является пионером в освоении умножителей на экстремально высокие напряжения и мощности. Инженеры компании постоянно бьют рекорды, достигнутые в этом классе устройств, и продолжают лидировать в этой области техники высоких напряжений.

#### Что собой представляет резонансный инвертор?

Резонансный инвертор — обобщенное название высокочастотных импульсных устройств, применяемых во многих источниках питания Spellman. Резонансные импульсные методы — новое поколение техники преобразования электрической мощности, следующее за традиционной технологией ШИМ (PWM).

Новая технология превосходит ШИМ по эффективности благодаря тому, что в ней переход транзисторов в закрытое/открытое состояние реализуется при нулевых уровнях напряжения и (или) тока. Это также позволяет избавиться от такого вредного эффекта, как электромагнитное излучение, которое обычно сопутствует процессам коммутации.



$$\text{Пиковый ток } L_{\text{peak}} = V\sqrt{C/L}$$

$$\text{Частота} = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

Резонансный инвертор

#### Что такое высоковольтный источник питания?

Высоковольтный источник питания — это сложная схема, выполняющая преобразование низкого напряжения в высокое. Термин «высокое напряжение» имеет не абсолютный, а относительный характер, но поскольку постоянное напряжение выше 62 вольт может причинить вред здоровью, для защиты человека от поражения электрическим током должны применяться соответствующие меры безопасности. Основные линейки высоковольтных источников питания Spellman обеспечивают номинальные значения выходного напряжения от 1 кВ до 360 кВ, а в целом оборудование компании предлагает диапазон от 62 В до 500 кВ.

Высоковольтные источники питания могут работать от постоянного или переменного входного напряжения. Постоянное входное напряжение экономически целесообразно использовать в оборудовании малой мощности (от 1 до 125 Вт). Типичными значениями входного напряжения постоянного тока являются +12 В и +24 В. Высоковольтные источники питания, использующие входное напряжение переменного тока могут работать от различных номинальных значений напряжений в диапазоне от 100 до 480 В (переменного тока), однофазного или трехфазного, в зависимости от конструкции. Высоковольтные источники питания с коррекцией коэффициента мощности/универсальным входом питания могут работать от любого входного напряжения в диапазоне 90 до 264 В переменного тока без какого-либо вмешательства пользователя.

Spellman располагает оборудованием, позволяющим обеспечить выходную мощность как менее 1 Вт, так и свыше 200 кВт. Мы предлагаем высоковольтные источники питания следующих категорий:

**ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ:  
ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ****ТЕХНОЛОГИЯ/ТЕРМИНОЛОГИЯ (продолжение)**

- Модульные высоковольтные источники питания
- Высоковольтные источники питания для установки в стандартную стойку
- Рентгеновские генераторы
- Источник рентгеновского излучения Monoblock<sup>®</sup>
- Высоковольтные источники питания, выполненные по спецификациям заказчика
- Высоковольтные источники питания специального назначения

Для высоковольтных источников питания важное значение имеет полярность. Доступны блоки с фиксированной позитивной, фиксированной негативной и реверсивной полярностью. Некоторые высоковольтные источники питания специального назначения могут изменять полярность электронным способом — после замыкания контактов переключателя или по поступлению удаленного управляющего сигнала.

Передача выходного напряжения высоковольтного источника питания к пользователю обеспечивается по высоковольтному кабелю с соответствующими характеристиками. Для компактных и недорогих блоков используется постоянно подключенный тонкопроволочный провод высокого напряжения, а для крупногабаритных — отсоединяемый коаксиальный кабель высокого напряжения с экранированием.

Компания Spellman High Voltage Electronics Corporation, ведущий независимый мировой производитель высоковольтных источников питания, нашедших широкое применение в промышленном, медицинском и научном оборудовании:

- Масс-спектрометрия
- Источники электронов и ионных лучей
- Оборудование энергоснабжения
- Капиллярный зонный электрофорез
- Электропрядение
- Зарядка конденсатора
- Электростатические держатели
- Усилители изображения и магнетроны

Компания Spellman предлагает высоковольтные источники питания для широкого спектра отраслей промышленности:

- Процедуры досмотра
- Медицинская визуализация
- Аналитические инструменты
- Инспекция
- Полупроводники
- Промышленные процессы
- Окружающая среда
- Подводные источники питания
- Специализированная продукция
- Научные исследования

Spellman High Voltage Electronics — ведущий мировой поставщик высоковольтных источников питания, специальных и стандартных преобразователей постоянного тока высокого напряжения и источников рентгеновского излучения Monoblock<sup>®</sup> для медицинских, промышленных, полупроводниковых, охранных, аналитических, лабораторных и подводных кабельных систем питания. В качестве глобального поставщика со стратегически расположенными конструкторскими и производственными предприятиями в Северной Америке, Европе и Азии компания Spellman стремится обеспечить лучшую в своем классе поддержку OEM-клиентов и конечных пользователей по всему миру.

**Линейные и переключаемые источники питания****Линейные высоковольтные источники питания**

Линейные источники питания были доминирующей технологией вплоть до конца 1970-х годов. Линейный источник питания использует последовательный транзистор для работы в качестве переменного резистора в качестве основного метода регулирования выходной мощности источника питания. Когда от источника питания требуется полная мощность, транзистор с последовательным переходом включается так, чтобы он имел наименьшее сопротивление, и на выход поступала максимальная мощность. Если требуется выходная мощность меньшей, транзистор с последовательным переходом будет работать как переменный резистор, рассеивая ненужную мощность в виде тепла для достижения желаемой выходной мощности.

Проходной транзистор, работающий в качестве рассеивающего устройства, требует больших радиаторов и часто вентиляторов для поддержания приемлемых рабочих температур. По сути, линейный источник питания просто тратит энергию, которая не требуется в качестве тепла. Из-за этого линейные источники питания, как правило, представляли собой большие, тяжелые, громоздкие устройства с очень низкой эффективностью. Кроме того, линейные источники питания ограничены в общей выходной мощности из-за проблем с отводом тепла, вызванных присущим им низким КПД. Линейные источники питания имеют заметное преимущество: они, как правило, очень тихие с точки зрения выходного шума и пульсаций, поскольку для их регулирования не используется переключающий элемент. Все стандартные высоковольтные источники питания марки Bertan, которые Spellman продавал в прошлом, были линейными источниками питания. Практически все эти старые устройства Bertan в настоящее время устарели, больше не продаются и не поддерживаются Spellman.

**Высоковольтные источники питания с режимом переключения**

Источники питания с режимом переключения называются таковыми, потому что они используют транзисторы в качестве «переключающих регуляторов». Линейный источник питания использует транзистор в качестве переменного резистора (транзистор частично включен, рассеивая большое количество энергии), в то время как в переключающем регуляторе используются транзисторные переключатели, которые либо полностью включены, либо полностью выключены.

## ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ: ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ/ПРИМЕНЕНИЕ (продолжение)

Когда транзистор полностью включен и течет ток, падение напряжения на нем минимально. Когда транзистор выключен, ток через него не протекает, рассеиваемая мощность практически равна нулю. Регулирование выходного сигнала источника питания достигается путем изменения соотношения времени включения и выключения при высокой частоте переключения (от десятков до сотен килогерц), чтобы минимизировать размеры магнитных и емкостных компонентов, используемых в процессе преобразования энергии. Благодаря этим фактам импульсные источники питания могут быть сделаны очень маленькими, компактными и высокоэффективными по сравнению с линейными аналогами. Чрезвычайно высокие уровни мощности, вплоть до сотен киловатт, можно очень эффективно контролировать с помощью технологий преобразования энергии в переключаемом режиме. Из-за рабочей частоты импульсного регулятора на выходе наблюдаются большие пульсации и шумы по сравнению с традиционным линейным регулятором. Но благодаря всем другим преимуществам, которые обеспечивают импульсные источники питания, они стали доминирующей формой технологии преобразования энергии, используемой сегодня.

### Почему в высоковольтных источниках питания используются коронирующие кольца/тороиды/шары?

Компания Spellman выпускает высоковольтные источники питания постоянного тока с выходным напряжением до 360 кВ и более. При столь высоком напряжении критичное значение для гашения коронных разрядов приобретает физическая геометрия поверхностей, находящихся под высоким напряжением. Коронный разряд сопровождается ярким свечением и шипящим звуком. Он возникает при создании на объекте высокого локального градиента электромагнитного поля, что вызывает ионизацию и возможный электрический пробой воздуха вблизи такой точки. Эффективное гашение коронного разряда является важным фактором, который необходимо учитывать при проектировании высоковольтных источников питания.

Большой диаметр и гладкая сферическая форма коронирующих колец/тороидов/шаров помогают держать под контролем локальное электромагнитное поле, предотвращая таким образом образование коронного разряда. С увеличением выходного напряжения необходимо также увеличивать диаметр коронирующих колец/тороидов/шаров для обеспечения эффективного гашения коронного разряда. За несколько десятилетий компанией Spellman накоплен большой опыт в области гашения коронных разрядов с использованием специализированного программного обеспечения для моделирования электромагнитного поля и оборудования для измерения частичного разряда, что позволяет нам обеспечить эффективное гашение коронного разряда в наших источниках питания независимо от выходного напряжения.

### Что такое высоковольтный источник питания последовательного («секционного») типа?

SLS является подкатегорией рентгеновских источников Spellman серии SL, обеспечивающих выходное напряжение от 160 до 360 кВ (и выше по специальному заказу) через отдельный высоковольтный блок, который в общем случае называется «секция». Необходимость в секции обусловлена тем, что чем больше выходное напряжение, тем менее доступны экономичные и надежные кабели и разъемы и тем труднее их включать в систему. Простое решение — это исключить лишнее кабели и разъемы и подавать выходное напряжение через отдельный высоковольтный секционный блок с воздушной изоляцией. Обычно для подавления образования коронного разряда при таком высоком выходном напряжении используют большие коронирующие кольца или тороиды. Устройства серии SLS имеют два основных блока: стойку управления и секционный блок с воздушной изоляцией.



### Что такое шариковая пайка?



Шариковая пайка — это технология пайки, часто используемая в высоковольтных устройствах. При такой пайке соединений, обычно находящихся под высоким напряжением, используются крупные шарики припоя. Большой диаметр и гладкая сферическая поверхность паяных соединений помогают держать под контролем локальное электромагнитное поле, предотвращая таким образом образование коронного разряда.

Пайка должна обеспечивать как надежное механическое соединение, так и эффективное гашение коронного разряда. Невыполнение любого из этих требований при шариковой пайке недопустимо. Для создания хорошего паяного соединения с шариком припоя требуется время, знание технологии, опыт работы с материалами и определенная температура. Попытки исправить соединение с шариком припоя обычно не дают улучшения, поэтому данный тип соединений следует правильно выполнять с первого раза.

## ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ: ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ/ПРИМЕНЕНИЕ

#### **Положительная, отрицательная, обратимая полярности — насколько все это важно при покупке источника питания?**

Источник питания постоянного тока обладает свойством полярности. Если взять в качестве опорного уровня потенциал земли, то на выходе источника может быть «Х» Вольт выше потенциала земли (положительная полярность) или же «Х» Вольт ниже потенциала земли (отрицательная полярность). В другой интерпретации можно представить источник питания с положительной полярностью как исток (т. е. производящий ток), а источник с отрицательной полярностью как сток (т. е. принимающий ток). Аппаратура, в которой используются высоковольтные источники, также является полярной, поэтому при заказе обязательно следует указывать полярность.

#### **Можно ли эксплуатировать источник при максимальных значениях напряжения или тока? Каковы допустимые пределы отклонений параметров источника от номинальных?**

Стандартный источник Spellman можно продолжительно эксплуатировать при паспортных значениях максимального тока/напряжения/мощности без ущерба его надежности или техническим характеристикам. Каждый выпускаемый нами источник прогоняется в режиме полного номинального тока/напряжения в течение 12 часов. Все наши источники разработаны в соответствии с руководством по техническому проектированию (Spellman Engineering Design Guidelines), которое устанавливает степень отклонения номинальных параметров соответствующих компонент источника. Источник питания, созданный в соответствии с данным руководством, имеет более чем приемлемые допуски, так что нет нужды эксплуатировать источник при параметрах, значения которых ниже паспортных.

#### **Можно ли потреблять от источника удвоенный ток, если понизить выходное напряжение в два раза?**

Большинство наших изделий (за исключением нескольких типов рентгеновских генераторов) обеспечивают (согласно паспорту) максимальную мощность при максимальных значениях напряжения и тока. Если требуется большее значение тока при меньшем напряжении, то мы можем предложить специальное исполнение по заданию заказчика. По этому поводу просим обращаться в департамент продаж Spellman.

#### **Почему время спада в источниках питания Spellman зависит от нагрузки?**

Согласно принятой схеме выходной каскад высоковольтного источника является емкостным. Его выходная емкость заряжается до величины рабочего напряжения. При выключении высокого напряжения (HV OFF), переходе в ждущий режим или полном отключении источника, эта емкость должна разрядиться с указанного выше значения до нуля.

Большинство выходных секций содержат диоды, входящие в цепи выпрямления или умножения напряжения. Диоды включены определенным образом (чтобы обеспечить нужную

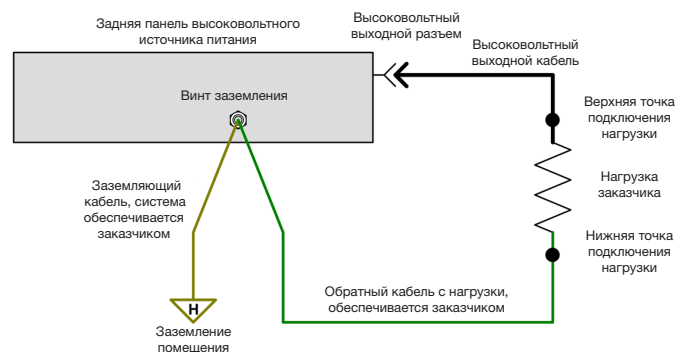
выходную полярность) и могут пропускать ток только в одном направлении. Из источника питания положительной полярности ток может только вытекать. Поскольку в таком источнике сток отсутствует, заряженная выходная емкость может разрядиться только на внешнюю нагрузку или на какую-либо другую цепь.

Поставляемое нами оборудование в действительности обладает небольшой степенью возможности «стока тока», обеспечиваемой сопротивлением входящего в комплект поставки делителя напряжения обратной цепи. Необходима особо высокая величина сопротивления (обычно десятки или сотни МегаОм или даже ГигаОм), т. е. выходная емкость опускается до нуля вольт через секунды или десятки секунд до уровня «нулевой нагрузки». По этой причине время среза нашего оборудования зависит от нагрузки.

#### **Как следует заземлять источник питания?**

Заземление крайне важно для работы источника питания. Уровень земли является опорным, относительно него отсчитываются все потенциалы и производятся все виды измерений. Важно, чтобы системная земля имела низкий импеданс и была подключена таким образом, чтобы токи, протекающие по земляному проводу, не создавали в отдельных частях схемы падений напряжения, которые могут оказывать влияние на другие ее части.

Наилучший способ минимизировать возможность появления падений напряжения в системной земле — использование земляного слоя печатной платы с подключением его на шасси и массу. Поскольку ток высокого напряжения исходит именно из источника питания, рекомендуется, чтобы на нем находилась точка привязки заземлений всех внешних устройств.



**Заземление источника питания**

Задняя панель источника должна быть надежно и прочно подсоединена к системной земле проводом максимально возможного (по имеющимся условиям) сечения. Благодаря этому шасси источника будет гарантированно находиться под известным опорным потенциалом. Следует учитывать, что большая часть повреждений высоковольтного источника питания связана с дугowymi разрядами в нагрузке. Дуга порождает большие переходные токи, и если заземление не выполнено надлежащим образом, они могут вывести из строя цепи управления источником и другие части схемы. Способы и порядок заземления более подробно излагаются в инструкции по эксплуатации. При возникновении дополнительных вопросов просим обращаться в департамент продаж.

**ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ:  
ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ/ПРИМЕНЕНИЕ (продолжение)****Можно ли включить источник питания по схеме с «плавающей» землей?**

Стандартные источники питания Spellman спроектированы и предназначены в основном для работы в качестве источников, использующих относительную землю. В источнике имеется только один высоковольтный выход, при этом ток обратного провода проходит через предусматриваемое пользователем электрическое соединение нагрузки с относительной землей. Для правильной работы и защиты от переходных токов этот обратный провод должен быть соединен с надежным заземлением.

Существует немало устройств, например, аппаратура ионно-лучевой имплантации, в которых источник питания работает с напряжениями относительно какого-либо другого потенциала, отличного от потенциала земли. Такие источники питания называют «плавающими». Если требуется именно такой источник, просим обращаться в департамент продаж Spellman.

**Можно ли эксплуатировать источники питания с номинальным напряжением 220 В перем. тока при напряжении 230 В перем. тока?**

Простой ответ утвердительный... в большинстве случаев можно. 220 В  $\pm 10\%$  переменного тока находятся в диапазоне от нижнего значения 198 В до верхнего 242 В. 230 В  $\pm 10\%$  переменного тока находятся в диапазоне от нижнего значения 207 В до верхнего 253 В.

«Нижняя часть» диапазона ограничена значением 230–10%, равным 207 В; оно находится в пределах нормального диапазона с нижним значением 220–10% (равным 198 В), поэтому в нижней части диапазона входного напряжения отсутствуют какие-либо сложности.

«Верхняя часть» диапазона ограничена значением 230+10%, которое составляет 253 В переменного тока. Оно всего лишь на 11 В превышает верхнее значение 220+10%, равное 242 В переменного тока. Высоковольтные источники питания компании Spellman спроектированы с достаточными запасами на возможное во входных компонентах переменного тока превышение напряжения и легко справляются с ним.

**Почему для источника питания следует предусматривать сигнал программирования тока?**

Источники питания компании Spellman имеют два контура регулирования, для режима источника напряжения и для режима источника тока. Большинство потребителей используют наши источники питания в качестве источника напряжения, управляя и регулируя выходное напряжение в режиме источника напряжения.

Токовый контур источника питания ограничивает ток в условиях короткого замыкания до уровня, заданного для контура тока (программирование тока).

Чтобы использовать источник питания в качестве источника напряжения, большинство пользователей устанавливают максимальное ограничение по току, и путем управления сигналом

программирования напряжения получают требуемое выходное напряжение. Работая в таком режиме, устройство функционирует в качестве источника напряжения и способно обеспечивать программируемое и регулируемое напряжение (от 0 до 100% номинального выходного напряжения) при токах вплоть до максимального возможного для устройства. В случае возникновения короткого замыкания устройство переходит в режим источника тока и ограничивает выходной ток до значения максимального номинального тока устройства.

Если токовый контур по ошибке запрограммирован на нуль (сигнал программирования тока отключен или выставлен в нуль), то это означает указание источнику питания обеспечить «нулевой» ток. Источник питания обеспечит нулевой ток и нулевое выходное напряжение. Фактически в этом нет ничего неправильного для источника питания, устройство всего лишь выполняет то, что ему указано.

Поэтому, если у вас источник питания «не обеспечивает никакого напряжения на выходе, хотя вы его задействовали и делаете программирование напряжения...», остановитесь и проверьте настройки программирования тока. Если в настройках программирования тока установлен нуль, то это и есть причина неполадки.

Выпускаемые компанией Spellman для установки в стойках устройства наподобие SL, SA, SR и ST имеют удобную возможность «предварительной настройки программирования». Когда устройство включено и находится в режиме ожидания, этой возможностью можно воспользоваться, нажав и удерживая зеленую кнопку HV OFF на передней панели. После этого (высокое напряжение не вырабатывается) расположенные на передней панели цифровые измерительные приборы для измерений напряжения и тока приборы покажут программируемые уровни кВ и мА, которые контуры напряжения и тока будут обеспечивать, в фактических кВ и мА. Это простой способ проверки и подтверждения программируемых уровней напряжения и тока, предусмотренных для источника питания.

**Почему для использования ваших источников питания с целью зарядки конденсаторов необходимо заполнить анкету?**

В некоторых случаях для зарядки конденсаторов может использоваться высоковольтный источник питания постоянного тока, но это не всегда возможно. Если частота перезарядки выше, чем примерно раз в секунду, зачастую требуется применение специализированного устройства для зарядки конденсаторов. При высокой частоте перезарядки от стандартного источника питания постоянного тока возможен перегрев электрических цепей на выходе. Кроме того рабочие характеристики, необходимые для оптимальной зарядки конденсаторов, могут быть не достигнуты. Анкета по зарядке конденсаторов позволит инженерам компании Spellman рассмотреть ваш случай и установить, можем ли мы предложить аппаратное решение, удовлетворяющее вашим требованиям.

Все задачи по зарядке конденсаторов необходимо анализировать на основании информации, изложенной в анкете. Возможно, в вашем случае будет уместен стандартный блок питания, либо для выполнения определенной задачи мы можем порекомендовать специальную конфигурацию

**ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ:  
ВИП И БЕЗОПАСНОСТЬ****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ/ПРИМЕНЕНИЕ (продолжение)**

стандартного блока (снижение внутренней емкости, дополнительное ограничение дугового разряда и т. д.). Возможно также, что в нашем распоряжении не окажется аппаратного решения, отвечающего конкретным требованиям. В любом случае заполните соответствующую анкету для задач по зарядке конденсаторов и получите рекомендации компании Spellman о подходящем решении для ваших целей.

**Какие возможности имеют высоковольтные делители напряжения серии HVD в отношении полос пропускания?**

Серия HVD высоковольтных делителей напряжения предназначена только для измерения высокого напряжения постоянного тока. Эти делители изготавливают исключительно с резистивными элементами. Паразитные емкостные эффекты на блоке делителя создают непредсказуемые помехи в измерении по переменному току. С помощью этой серии высоковольтных делителей напряжения можно точно измерять только параметры постоянного тока. По этой причине в паспорте изделий серии HVD имеется примечание:

Серия HVD высоковольтных делителей напряжения не имеет возможности измерения переменного тока какой бы то ни было полосы частот. Делители предназначены только для измерения постоянного тока в стационарном режиме.

**Что такое коэффициент мощности? Что такое коэффициент мощности импульсного источника питания?**

Коэффициент мощности — это отношение активной мощности к полной мощности. Он обычно выражается в виде десятичной дроби меньше 1. Активная мощность выражается в ваттах, а полная — в вольт-амперах (ВА). Коэффициент мощности импульсного источника питания зависит от типа входного переменного тока: однофазный, трехфазный или с активной коррекцией коэффициента мощности.

Коэффициент мощности однофазных импульсных источников питания без коррекции обычно довольно низкий, около 0,65. Это связано с тем, что в большинстве устройств для получения напряжения постоянного тока используется однополупериодная схема выпрямления с конденсаторами. В такой конфигурации ток потребляется только на пике каждого цикла, при этом образуются узкие и высокие импульсы тока, что и приводит к низкому коэффициенту мощности.

Трехфазные импульсные источники питания без коррекции характеризуются более высоким коэффициентом мощности, например 0,85. Это связано с тем, что несмотря на используемую схему выпрямления с конденсаторами для получения напряжения постоянного тока наличие трех фаз увеличивает суммарный коэффициент мощности.

Устройства со схемами активной коррекции коэффициента мощности могут отличаться очень высоким коэффициентом мощности, например 0,98. Чаще всего используется т. н. «схема

преобразователя с повышением», с динамическим изменением рабочего цикла, что резко повышает коэффициент мощности.

Почему так важен коэффициент мощности? Источникам питания без коррекции могут ограничивать полезную мощность, которую вы можете получить из электросети. Все кабели питания, автоматические предохранители, разъемы и электросети рассчитываются на максимальную общую потребляемую мощность. При использовании источников питания без коррекции, фактическую потребляемую и протекающую по проводам мощность. При использовании источника питания с активной коррекцией коэффициента мощности, максимальная сила тока в сети значительно ниже, что позволяет источнику питания потреблять больше тока и обеспечить более высокую выходную мощность ИП в той же электрической сети.

Кроме этого, гармонические помехи, наводимые источником питания на сеть переменного тока, также могут быть ниже. Еще одним преимуществом активной коррекции коэффициента мощности является возможность питания от сети широкого диапазона напряжений, благодаря чему источники питания могут использоваться по всему миру в сетях переменного тока напряжением от 88 до 264 В. Источники питания с коррекцией коэффициента мощности определенно имеют преимущества.

**Можно ли подключить высоковольтный источник питания, рассчитанный на работу от однофазной сети переменного тока 220 В, к трехфазной сети переменного тока 208 В?**

Ответ прост: да, использовать источник питания можно, если подключить любые две фазы сети переменного тока 208 В к двум входным контактам переменного тока (однотонному коричневому и однотонному синему). Подключите желто-зеленый провод к контакту заземления и надлежащим образом заземлите источник питания со всеми необходимыми соединениями с нагрузкой. Тем не менее, есть пару моментов, которые стоит уточнить.

Однофазная сеть 220 В обычно имеет допуск  $\pm 10\%$ , то есть минимальное напряжение может составлять 200 В. В сети 208 В допуск также обычно составляет  $\pm 10\%$ , то есть минимальное напряжение может составлять 187 В. Это на 13 вольт меньше минимального напряжения в сети 220 В, которое составляет 200 В. Поэтому возможно, что при подключении к сети 208 В источника питания, рассчитанного на 220 В, напряжение на входе может упасть ниже расчетного.

Но является ли это проблемой? В большинстве случаев нет, проблема возникнет только в одном случае — при использовании блока питания с максимальным напряжением / с максимальной силой тока и с выдачей максимальной мощности. В таком случае, если напряжение на входе упадет ниже 200 В, устройство может выйти из регулируемого режима, что приведет к отказу типа «Ошибка регулирования». Источник питания прекратит генерацию высокого напряжения; это не приведет к его повреждению, однако такое отключение может привести к прерыванию производственного процесса. Если блок питания не используется с максимальным напряжением/с максимальной силой тока и выдачей максимальной мощности, скорее всего отказы такого типа в источнике питания не будут наблюдаться.



## MONOBLOCK®. ОХЛАЖДЕНИЕ, ПРОГРЕВ и ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ

### РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОХЛАЖДЕНИЮ

Системы Monoblock® с конвекционным/принудительным воздушным охлаждением:

Рентгеновские источники Monoblock® следует эксплуатировать при температуре окружающей среды от 0 до 40 °С. Для достижения максимальной эффективности и стабильной работы необходимо поддерживать температуру масла не выше 55 °С. Обычно для этого достаточно конвекционного охлаждения. Однако в некоторых конфигурациях для поддержания такой температуры масла может потребоваться дополнительный внешний вентилятор (устанавливается пользователем). На рисунке 1 представлены рекомендованные схемы размещения вентиляторов.

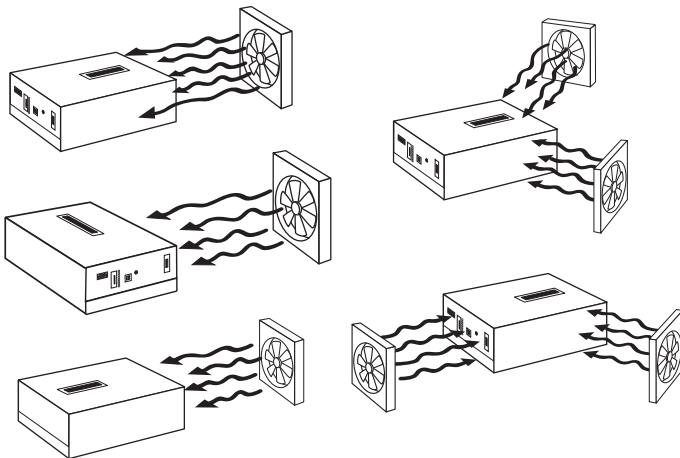


Рисунок 1

Системы Monoblock® с встроенной системой охлаждения:

Рентгеновские источники Monoblock® с встроенной системой охлаждения следует эксплуатировать при температуре окружающей среды от 0 до 40 °С. Для достижения максимальной эффективности и стабильной работы необходимо поддерживать температуру внешней среды не выше 40 °С. Чтобы предотвратить скопление пыли и грязи на вентиляторах и радиаторе, рекомендуется проводить профилактическое обслуживание.

### ПРОЦЕДУРА ПРОГРЕВА

После первой установки и/или после периодов времени простоя (под временем простоя понимается перерыв в работе рентгеновского источника) компания Spellman High Voltage рекомендует придерживаться следующих графиков прогрева. Это обеспечивает надлежащую работу рентгеновской трубки. Пренебрежение этой рекомендацией может привести к необратимому повреждению рентгеновской трубки и/или уменьшению ожидаемого срока службы.

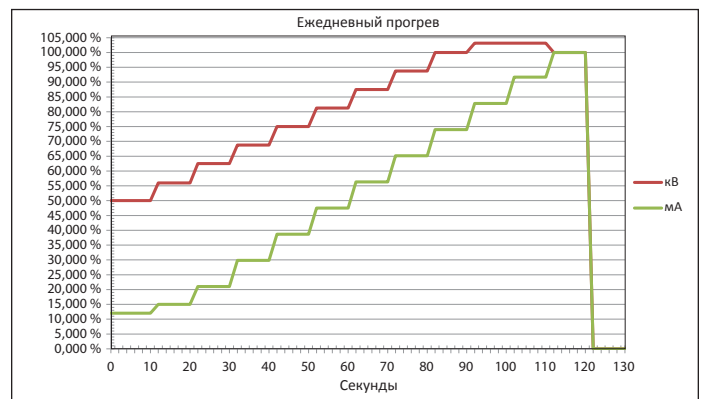
**Для устройств с максимальным выходным током менее 2,5 мА следует использовать минимальный ток прогрева 0,3 мА. См. пример для устройства 160 кВ, 1,25 мА на следующей странице.**

- |                        |  |
|------------------------|--|
| Время простоя > 12 ч   | Ежедневный прогрев (прибл. 120 с)        |
| Время простоя 2–30 дн. | Кратковременный прогрев (прибл. 360 с)   |
| Время простоя 1–3 мес. | Длительный прогрев (прибл. 720 с)        |
| Время простоя > 3 мес. | Продолжительный прогрев (прибл. 60 мин.) |

### ПРИМЕЧАНИЯ

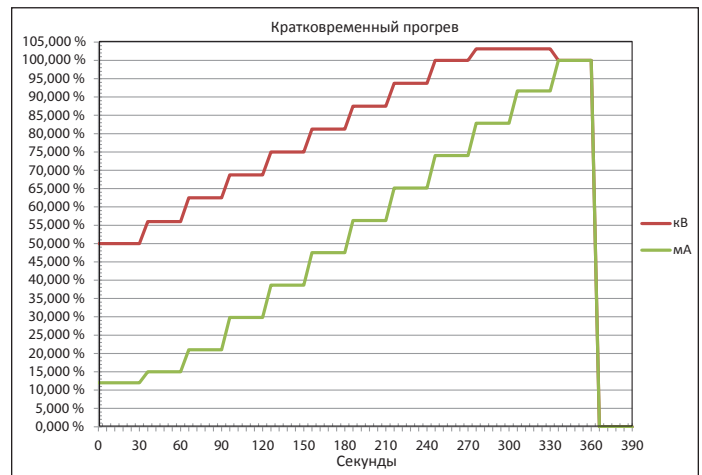
- Ниже приведены общие схемы прогрева. Всегда используйте схему, поставляемую с конкретным рентгеновским источником Monoblock. В случае сомнений обратитесь за помощью в компанию Spellman.
- Если во время прогрева происходит дуговой пробой, БЕЗ отказа/отключения, продолжайте процедуру по всему профилю.
- Если во время прогрева происходит дуговой пробой, С отказом/отключением, перезагрузите рентгеновский источник Monoblock и начните выполнение профиля заново с шага 1.

### Ежедневный прогрев



Ежедневный прогрев												
	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3	Шаг 4	Шаг 5	Шаг 6	Шаг 7	Шаг 8	Шаг 9	Шаг 10	Шаг 11	Шаг 12
Напряжение (кВ)	50,00%	56,00%	62,50%	68,75%	75,00%	81,25%	87,50%	93,75%	100,00%	103,12%	103,12%	100,00%
Ток (мА)	12,00%	15,00%	21,00%	29,83%	38,66%	47,50%	56,30%	65,16%	74,00%	82,83%	91,66%	100,00%
Время (секунды)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

### Кратковременный прогрев



Кратковременный прогрев												
	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3	Шаг 4	Шаг 5	Шаг 6	Шаг 7	Шаг 8	Шаг 9	Шаг 10	Шаг 11	Шаг 12
Напряжение (кВ)	50,00%	56,00%	62,50%	68,75%	75,00%	81,25%	87,50%	93,75%	100,00%	103,12%	103,12%	100,00%
Ток (мА)	12,00%	15,00%	21,00%	29,83%	38,66%	47,50%	56,30%	65,16%	74,00%	82,83%	91,66%	100,00%
Время (секунды)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

## MONOBLOCK®. ОХЛАЖДЕНИЕ, ПРОГРЕВ и ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ

### MONOBLOCK®. ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ

#### Требуется ли поддерживать аппарат Monoblock® в охлажденном состоянии? Почему?

Для обеспечения максимальных эксплуатационных характеристик и надежной работы вашего рентгеновского источника Monoblock® важно поддерживать его рабочую температуру в пределах рекомендованного диапазона. Пожалуйста, перейдите по приведенной ниже ссылке для ознакомления с рекомендациями по охлаждению.

#### Какое периодическое техническое обслуживание необходимо выполнять для аппарата Monoblock®?

Периодическое/предупредительное техническое обслуживание следует начинать с визуального осмотра аппарата. Период времени между осмотрами будет зависеть от условий среды, в которой работает рентгеновский источник Monoblock®.

Как минимум его необходимо осматривать ежемесячно. Проверка состояния должна включать в себя визуальный осмотр вентиляционных отверстий на крышке контрольного блока. Отверстия должны быть чистыми, без мусора внутри, и не блокированы препятствиями. Для аппарата Monoblocks® со встроенной системой охлаждения необходимо осматривать охлаждающий вентилятор и теплообменник, содержать их в чистоте, удалять любые препятствия на пути движения воздуха. Кроме того, нужно проверять шланги на отсутствие повреждений. Внешняя поверхность аппарата и выходное отверстие для рентгеновских лучей необходимо проверять на отсутствие следов масла. Если в названных местах замечено масло, аппарат следует вернуть для техобслуживания. В рентгеновском источнике Monoblock® отсутствуют детали, которые обслуживаются на месте эксплуатации аппарата.

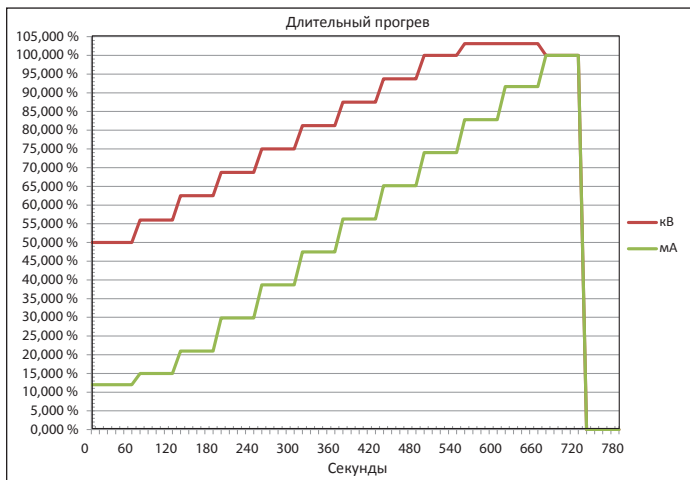
Отдел обслуживания клиентов компании Spellman High Voltage может предложить выполнить предупредительное техническое обслуживание для рентгеновских источников Monoblock®, которые эксплуатируются в течение длительного времени. По вопросам, связанным с периодическим и предупредительным техобслуживанием, обратитесь в отдел обслуживания клиентов компании Spellman High Voltage по указанному адресу электронной почты: sales@spellmanhv.ru.

#### Есть ли минимальные значения тока и напряжения, которые я могу задать в своем аппарате Monoblock®? Почему?

Значения тока и напряжения, задаваемые для рентгеновского источника Monoblock®, не должны быть меньше границы рабочего диапазона, указанного в технических характеристиках изделия. Настройка тока и напряжения ниже этих значений может стать причиной сбоев и неисправностей оборудования. Рентгеновские источники Monoblocks® компании Spellman High Voltage обладают функцией защиты, которая отключает ток нити накала (не учитывая ток предварительного нагрева в дежурном режиме), если выходное

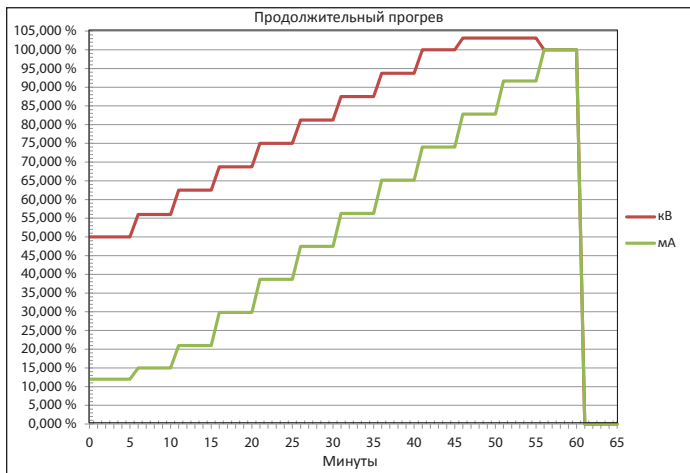
### ПРОЦЕДУРА ПРОГРЕВА (продолжение)

#### Длительный прогрев



Длительный прогрев												
	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3	Шаг 4	Шаг 5	Шаг 6	Шаг 7	Шаг 8	Шаг 9	Шаг 10	Шаг 11	Шаг 12
Напряжение (кВ)	50,00%	56,00%	62,50%	68,75%	75,00%	81,25%	87,50%	93,75%	100,00%	103,12%	103,12%	100,00%
Ток (мА)	12,00%	15,00%	21,00%	29,83%	38,66%	47,50%	56,30%	65,16%	74,00%	82,83%	91,66%	100,00%
Время (секунды)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

#### Продолжительный прогрев



Продолжительный прогрев												
	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3	Шаг 4	Шаг 5	Шаг 6	Шаг 7	Шаг 8	Шаг 9	Шаг 10	Шаг 11	Шаг 12
Напряжение (кВ)	50,00%	56,00%	62,50%	68,75%	75,00%	81,25%	87,50%	93,75%	100,00%	103,12%	103,12%	100,00%
Ток (мА)	12,00%	15,00%	21,00%	29,83%	38,66%	47,50%	56,30%	65,16%	74,00%	82,83%	91,66%	100,00%
Время (минуты)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

#### Пример продолжительного прогрева для устройства 160 кВ, 1,25 мА:

Продолжительный прогрев												
	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3	Шаг 4	Шаг 5	Шаг 6	Шаг 7	Шаг 8	Шаг 9	Шаг 10	Шаг 11	Шаг 12
Напряжение (кВ)	80,0	89,6	100,0	110,0	120,0	130,0	140,0	150,0	160,0	165,0	165,0	160,0
Ток (мА)	0,300	0,300	0,300	0,373	0,483	0,594	0,704	0,815	0,925	1,035	1,146	1,250
Время (минуты)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

\*Минимальный ток прогрева 0,300 мА

#### Пример продолжительного прогрева для устройства 160 кВ, 3 мА:

Продолжительный прогрев												
	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3	Шаг 4	Шаг 5	Шаг 6	Шаг 7	Шаг 8	Шаг 9	Шаг 10	Шаг 11	Шаг 12
Напряжение (кВ)	80,0	89,6	100,0	110,0	120,0	130,0	140,0	150,0	160,0	165,0	165,0	160,0
Ток (мА)	0,360	0,450	0,630	0,895	1,160	1,425	1,689	1,955	2,220	2,485	2,750	3,000
Время (минуты)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

## МОНОВЛОК<sup>®</sup>. ОХЛАЖДЕНИЕ, ПРОГРЕВ и ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ

### МОНОВЛОК<sup>®</sup>. ЧАСТО ЗАДАВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ (продолжение)

напряжение находится ниже рабочего диапазона. Эта функция должна защищать нить накала в рентгеновской трубке. Благодаря этой функции на трубку не подается ток, если его значение в системе ниже минимального. Рентгеновские источники Monoblocks<sup>®</sup> компании Spellman High Voltage имеют функцию контроля стабильности выходного напряжения. Из-за соотношения сигнал/шум в контрольных цепях работа ниже максимального номинального напряжения всего на несколько процентов может привести к нарушению регулировки напряжения. Аналогичная защитная функция действует для настройки значения тока, которая может автоматически отключать аппарат при снижении тока на несколько процентов от номинального значения в процессе работы. Кроме того, в некоторых аппаратах Monoblocks<sup>®</sup> ток предварительного нагрева в режиме ожидания вызовет ток эмиссии в этом режиме, который будет препятствовать нормальному регулированию тока ниже заданного рабочего диапазона. Попытки использовать аппарат при значении тока ниже тока эмиссии при прогреве в режиме ожидания повлечет за собой перегрузку по току.

### *Есть ли особые инструкции в отношении механического крепления аппарата Monoblock<sup>®</sup>?*

Рентгеновский источник Monoblock<sup>®</sup> сконструирован так, чтобы использовать его в любом положении. Тем не менее при его установке в систему могут потребоваться особые соображения в зависимости от того, на что будет опираться аппарат в системе. Неправильный монтаж источника рентгеновского излучения Monoblock<sup>®</sup> или неправильный монтаж компонентов системы, таких как коллиматоры пучка, может стать причиной ее повреждения. Мы рекомендуем связаться с вашим торговым представителем или отделом обслуживания клиентов компании Spellman High Voltage перед монтажом аппарата.

### *Как часто необходимо прогревать аппарат Monoblock<sup>®</sup>? Почему?*

Прогрев рентгеновской трубки необходимо выполнять в соответствии с рекомендованным графиком, прилагаемым к вашему аппарату. Общее руководство по прогреву можно найти на веб-сайте компании Spellman High Voltage (перейдите по ссылке). Обычно прогрев осуществляют после начальной установки и после периодов бездействия (период бездействия определяется как время, при котором рентгеновское излучение не генерировалось). Руководство включает в себя программу дневного прогрева и более длительную программу для большего периода бездействия. Во время прогрева производится постепенное увеличение тока и напряжения в рентгеновской трубке для уменьшения содержания остаточного

газа в ней перед тем, как трубка начнет работу на полную мощность. Прогрев также минимизирует неравномерное распределение потенциала или электрического поля на стекле трубки. Выполнение рекомендованного графика прогрева рентгеновской трубки поможет продлить срок ее эксплуатации и предотвратить образование дугового разряда, который может вызвать ее необратимое повреждение.

### *Как стабильность дозы рентгеновского излучения соотносится с устойчивостью по напряжению/току?*

Для понимания связи между стабильностью по напряжению/току и стабильностью дозы рентгеновского излучения необходимо принимать во внимание несколько факторов. Доза излучения не прямо пропорциональна высокому напряжению по ширине рентгеновской трубки, она изменяется квадратично ( $X^2$ ). Если высокое напряжение по ширине трубки удваивается, доза рентгеновского излучения увеличивается в четыре раза. Что касается тока в рентгеновской трубке, он прямо пропорционален дозе рентгеновского излучения.

### *Можно ли безопасно хранить аппарат без использования в течение продолжительного периода времени?*

Проблема с хранением аппарата Monoblock<sup>®</sup> связана с периодом бездействия рентгеновской трубки. Рентгеновские трубки требуют прогрева после длительных периодов бездействия. Рекомендуется прогревать трубку аппарата Monoblocks<sup>®</sup> через каждые три месяца хранения. Если это невозможно, может возникнуть потребность в более длительных программах прогрева, для получения которых необходимо связаться с компанией Spellman. Вообще говоря, период бездействия более шести месяцев может стать проблемой для трубки, и его следует избегать настолько это возможно. После довольно длительного периода бездействия (более шести месяцев) даже самая длительная программа прогрева может быть недостаточной для некоторых рентгеновских трубок.

### *Будет ли рентгеновская трубка работать вечно?*

Нет, рентгеновские трубки являются расходными устройствами и не могут работать вечно. Срок службы трубки зависит от нескольких факторов, включая (но не ограничиваясь ими) следующие: правильный прогрев, охлаждение, время излучения и качество изготовления трубки. Если работа вашего оборудования связана с длительным рентгеновским излучением в течение года (более 3000 часов), рекомендуется уведомить об этом компанию Spellman, чтобы принять во внимание этот факт при конструировании вашего аппарата серии Monoblock<sup>®</sup>, а также то, чего вы ожидаете от него при эксплуатации.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-01

**Что означает выражение: выход с «привязкой к потенциалу земли»?**

Большинство стандартных изделий из каталога Spellman относятся к категории источников питания «с привязкой к потенциалу земли». Источник питания с привязкой к потенциалу земли, как правило, имеет только один выходной разъем высокого напряжения. Внутри прибора обратный провод умножителя высокого напряжения имеет привязку к заземленному шасси устройства. Это шасси имеет привязку к «собственному заземлению» в системе потребителя с помощью провода защитного заземления в составе силового кабеля и предусмотренной отдельной клеммы системного заземления для потребителя. В случае привязки выхода источника питания к земле упрощается замер выходного напряжения и тока для получения сигналов обратной связи, необходимых для работы системы регулирования источника питания. Высоковольтный делитель обратной связи с высоким импедансом и привязкой к заземлению контролирует напряжение на выходе, а резистор обратной связи, расположенный последовательно с клеммой обратного провода умножителя, контролирует ток на выходе.

При привязке нагрузки потребителя к земле цепь является замкнутой. Во всех измерениях, выполняемых относительно источника питания, в качестве опорного потенциала используется заземление. Привязка источника питания к заземлению упрощает его конструкцию и изготовление. Все сигналы управления и контроля также имеют привязку к заземлению, тем самым упрощая эксплуатацию источника питания.

Источники питания с привязкой к заземлению не могут в своем исходном виде быть включены последовательно («сложены в стопку») для получения высоких выходных напряжений. Вся выходная схемотехника имеет привязку к земле, что препятствует ее подключению к любому другому источнику напряжения или опорному потенциалу.

## УП-02

**«Заземление есть заземление», правильно? Скажем так: «Не всегда». Что же необходимо знать?**

Заземление — это одна из тех «идеальных» вещей наподобие «идеального переключателя», о которых рассказывают в техникуме. Идеальный переключатель обладает всеми положительными характеристиками (отсутствие потерь, нулевое время переключения и т. д.) и не имеет отрицательных. Суть в том, что заземление будет таким, каким вы его сделаете, и сохранит свои характеристики, только если вы будете делать все правильно.

Намного проще начать с чистого листа и создать хорошую систему заземления, чем пытаться исправить плохую. Проблемы с заземлением может оказаться трудно выявить, проанализировать и разрешить. Здесь приведены несколько полезных советов по созданию хорошей системы заземления, от которой

выиграет как ваш высоковольтный источник питания (ВИП), так и вся остальная система. Система заземления начинается с того, что вы используете в качестве исходной точки заземления. Существует несколько вариантов: труба холодной воды, труба кабелепровода системы электроснабжения, стальная арматура каркаса здания или старомодный заземляющий стержень. Независимо от того, что Вы используете, подключите эту точку к шпильке заземления ВИП с помощью короткого провода большого сечения с соответствующим наконечником. Земля является универсальной точкой отсчета, и, привязав ВИП к ней, вы создадите хорошую опорную точку. Следующим важным заземляющим соединением является подсоединение обратного провода нагрузки. Какой бы ток не выходил из ВИП (непрерывный номинальный или ток дугового разряда в переходном режиме), обязательно должна быть в наличии обратная цепь к источнику питания. Эта цепь должна быть реальным физическим проводом, опять-таки коротким и большого сечения. При таком соединении большие переходные токи дуги будут двигаться по известному пути, не влияя на другое оборудование с привязкой к заземлению.

Пояснение: «3-й зеленый провод заземления» в кабеле питания не является полноценным проводом системы заземления. Этот провод выполняет функцию защитного заземления и не предназначен для использования в качестве элемента системы заземления. Стиральная машина обычно имеет металлическую раму. При повреждении, внутренний провод питания может прикоснуться к раме, и это может привести к поражению электрическим током при открывании люка загрузки. В этом случае «3-й провод» заземляет раму, перепуская ток на землю и предотвращая удар электрическим током. В этом заключается его функция — выступать в роли дополнительного защитного заземления. Не следует рассчитывать на использование этого соединения в качестве части схемы заземления системы.

Подсоедините все дополнительные заземления системы к главной точке заземления высоковольтного источника питания. Будь то система заземления типа «звезда» или система заземления на корпус/шину, подсоедините провод заземления к главной точке заземления источника питания. Соблюдение этих рекомендаций поможет создать систему заземления, работающую надлежащим образом.

## УП-03

**Вы же не станете использовать кирку для лечения зубов: чрезмерное завышение технических характеристик источника питания может оказаться неразумным**

Правильно выбрав источник питания для решаемой задачи, вы получите выигрыш в нескольких отношениях: небольшой размер, вес, стоимость и прекрасная производительность. Чрезмерное завышение технических характеристик и приобретение «большого источника питания, чем необходимо» может при некоторых обстоятельствах привести к ухудшению производительности системы.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-03 (продолжение)

Все источники питания Spellman разрабатываются, изготавливаются и испытываются при полном номинальном выходном напряжении и токе. Наши инженеры применяют соответствующие ограничения рабочих характеристик в целях надежной и длительной эксплуатации при полном номинальном напряжении и токе. Нашим источникам питания не требуются никакие дополнительные снижения номинальных рабочих характеристик. Если вам необходимы 30 кВ, купите устройство на 30 кВ и используйте его при 30 кВ, именно на это оно и рассчитано. То же самое касается тока и мощности. Вы получите максимальную отдачу от каждой потраченной копейки, если купите источник питания, наиболее приближенный к вашим требованиям. Если вы можете позволить себе более крупный, тяжелый и дорогой источник питания, то нет ничего пагубного в том, чтобы иметь небольшой запас мощности, однако для получения надежной работы НЕ требуется завышение технических характеристик. Небольшое завышение характеристик выльется в дополнительный вес, размер и стоимость. Значительное завышение может даже привести к снижению производительности системы.

Вы же не будете использовать малярную кисть шириной 10 см для того, чтобы подкрасить тонкие деревянные планки отделки в своем доме. Большая кисть прекрасно подходит для быстрого нанесения значительного количества краски на большую площадь, однако маленькая кисть позволяет лучше наносить материал и контролировать процесс, когда дело касается покраски небольших предметов. Соизмеряйте инструмент для выполнения необходимой работы и получения оптимального результата.

То же самое касается и источников питания. Источник питания на 30 кВ может работать и на 250 В, но когда он эксплуатируется с нагрузкой менее чем 1 % от своей номинальной мощности, становится довольно непросто контролировать его работу с большой степенью точности. В этом случае разумнее применить источник питания с максимальным выходным напряжением 500 В или хотя бы 1 кВ.

Ни один из наших источников питания не имеет «минимальных требований по нагрузке». Но помните: если вы хотите добиться прекрасной работы на низком напряжении или мощности, выбирайте источник питания с максимальными режимами работы, близкими к вашим требованиям. Проще добиться точной работы, когда источник питания надлежащим образом соразмерен и выбран для целевого использования. Если этого не сделать, проблемы наподобие чрезвычайно малых сигналов управления или обратной связи, отношений сигнал-шум, токов делителя обратной связи могут чрезвычайно затруднить работу источника питания в режимах со значениями параметров, составляющими лишь малые проценты от их максимальных значений.

## УП-04

**А где же нижний предел? Почему соотношение сигнал-шум важно при управлении высоковольтными источниками питания?**

Фактически все источники питания Spellman являются управляемыми. Обычно аналоговый сигнал управления напряжением 0–10 В с привязкой к потенциалу земли пропорционально соответствует 0–100 % полного номинального напряжения и (или) силы тока. Модульные источники питания, как правило, воспринимают только дистанционно подаваемый сигнал, в то время как источники в стойечном исполнении имеют также многооборотные потенциометры на передней панели, что обеспечивает возможность местного управления.

Рассмотрим два примера устройств, в которых 0–10 В напряжения управления соответствуют 0–100 % выходного напряжения. Первое устройство — SL100P300 (максимум 100 кВ), а второе — SL1P300 (максимум 1 кВ).

Допустим, требуется получить относительно низкое выходное напряжение 100 В; рассмотрим уровень напряжения управления, которое требуется для каждого устройства.

**SL100P300**  
(100/100,000) (10) = 10 мВ

**SL1P300**  
(100/1000) (10) = 1 В

SL100P300 требует сигнала управления 10 мВ, тогда как SL1P300 требуется сигнал управления в 1 В для получения тех же 100 В на выходе.

Шум присутствует в большинстве электрических систем. Это фоновый сигнал низкого уровня, возникающий от импульсных стабилизаторов, схем синхронизации и т. п. В идеале желательно иметь нулевой шум, но в реальной жизни некоторый шум всегда есть и с ним надо считаться. В источниках питания серии SL наличие 25 мВ фонового шума на аналоговых линиях управления не является чем-то необычным. В идеале желательно было бы получить максимальный уровень сигнала управления, так чтобы шумовой сигнал имел минимальное влияние. Давайте посмотрим, как этот шум воздействует на сигналы наших двух источников питания, взятых в качестве примера.

**SL100P300**  
Сигнал = 10 мВ  
Шум = 25 мВ

**SL1P300**  
Сигнал = 1000 мВ (1 В)  
Шум = 25 мВ

Отношение «сигнал — шум»: сигнал ниже, чем шум

Отношение «сигнал — шум»: сигнал в 40 раз выше, чем шум

Легко заметить, что получение стабильного, повторяемого напряжения 100 В на выходе от SL100P300 будет задачей не из простых, тогда как в случае SL1P300 этого добиться довольно легко.

При необходимости получения низких уровней напряжения на выходе следует помнить о требуемых сигналах управления и о том, как они соотносятся с уровнями шума в системе. Учет этих факторов позволит получить стабильные, повторяемые параметры на выходе, влияние шума при этом будет минимальным.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-05

**«А теперь ты потрогай!» Разъяснения по поводу времени спада выходного напряжения высоковольтного источника питания и времени разряда**

Рассматривать лишь в качестве дополнительных данных о работе блоков питания. Настоящее примечание по применению само по себе не является «инструкцией по технике

безопасности» для правильной установки и эксплуатации высоковольтных источников питания. Для ознакомления с полным объемом сведений по безопасности необходимо обратиться к документации, поставляемой с нашим оборудованием. Как правило, высокие напряжения создаются инвертором, который запитывает повышающий трансформатор, подключенный к умножителю напряжения. Умножитель напряжения (схема, состоящая из конденсаторов и диодов) работает по принципу заряда и разряда конденсаторов на чередующихся полупериодах переменного напряжения, при этом в качестве выходного напряжения используется сумма напряжений этих конденсаторов, включенных последовательно. По определению, цепь умножителя напряжения — емкостная по своей природе, и она обладает способностью накапливать и удерживать заряд.

Из соображений повышения КПД любые внутренние пути тока, направленные к заземлению, сводятся к минимуму. Как правило, единственной резистивной линией, соединяющей выход блока питания с землей, является высокоомная цепь делителя напряжения обратной связи. Этот делитель напряжения обратной связи вырабатывает низкоуровневый сигнал обратной связи с привязкой к земле, который используется для управления и регулирования блока питания.

Ориентация диодов в блоке умножителя такова, что блок питания положительной полярности может лишь подавать ток, но не отводить его. Поэтому в условиях отсутствия нагрузки цепь делителя напряжения обратной связи становится единственным путем разряда выходного напряжения. Рассмотрим типичное значение емкости умножителя блока и сопротивление делителя обратной связи, чтобы понять, о каких постоянных времени разряда (RC) идет речь в условиях отсутствия нагрузки.

**SL60P3000**

60 кВ, 0–5 мА, 300 Вт

$C$  (умножитель) = 2285 пФ  $R$  (обр. связь) = 1400 МОм

$RC$  = (2285 пФ) (1400 МОм) = 3,199 с

5 RC постоянных времени требуется для приближения к нулевому значению ( $\approx 1,2\%$ )

(5) (3,199 с) = 15,995 с

Вышеприведенный пример иллюстрирует, как в условиях отсутствия нагрузки получается так, что для разряда выходного напряжения может потребоваться значительное время. Если к выходу блока питания подключена внешняя нагрузка, то постоянная времени разряда может быть значительно меньше. Поэтому время спада напряжения на высоковольтных блоках питания называется «зависимым от нагрузки». Об этом следует помнить при работе с различными высоковольтными источниками питания.

## УП-06

**«Просто закоротить внешнюю блокировку?» Почему так делать не стоит**

Многие высоковольтные источники питания Spellman имеют функцию внешней блокировки. Как правило, внешняя блокировка обеспечивается двумя сигнальными соединениями на клеммной колодке задней панели или интерфейсным соединителем. Эта функция дает пользователю возможность отключить и предотвратить создание высокого напряжения в безопасном режиме. Данная схема внешней блокировки может быть легко включена в пользовательские настройки для обеспечения дополнительного уровня безопасности оператора.

В большинстве случаев ток катушки реле, используемого для фиксации блока питания в режиме генерирования высокого напряжения, выходит и поступает обратно через контакты внешней блокировки на задней панели. Обычно это низковольтная катушка реле (12 В или 24 В постоянного тока, ток срабатывания в диапазоне десятков миллиампер). Для перевода блока питания в режим генерирования высокого напряжения (и продолжения работы в нем) два контакта внешней блокировки должны быть соединены друг с другом через низкоомный соединитель.

Разрыв этого соединения предотвращает перевод блока питания в режим генерирования высокого напряжения. Кроме того, если разомкнуть данное соединение при активной работе блока в режиме генерирования высокого напряжения, блок питания перейдет в режим отключения высокого напряжения. Внешняя блокировка — это наилучший метод управления выходом блока питания в отношении обеспечения безопасности, за исключением отсоединения блока питания от источника электроснабжения.

Как правило, наши блоки питания поставляются с двумя контактами внешней блокировки, замкнутыми друг на друга для быстрого и простого приведения блока в действие. Такая конфигурация блока, безусловно, позволяет ему работать, но функция внешней блокировки при этом не используется.

Согласно рекомендациям компании Spellman любые открытые детали, находящиеся под высоким напряжением, должны быть изолированы от возможного прикосновения с использованием подходящих физических барьеров. Для защиты операторов от случайных контактов с потенциально смертельными напряжениями должны применяться высоковольтные клетки или ограждения. Дверцы или съемные панели таких клеток или ограждений должны быть оборудованы нормально открытым выключателем блокировки, который должен переводиться в замкнутое состояние только при закрытой дверце или панели. Открытие дверцы или панели должно переводить блок питания в режим отсутствия высокого напряжения. Блок не должен переводиться в режим высокого напряжения, пока дверца или панель не будет закрыта.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-07

**Чему равно максимально допустимое напряжение для коаксиального кабеля RG8-U?**

Выходной кабель и соединители — существенные элементы, когда дело касается источников питания, выходное напряжение которых может достигать 100 000 В и более. Для безопасного и надежного доступа, а также для обеспечения необходимого для заказчика выходного напряжения кабеля и соединители должны работать как единая система.

Со многими высоковольтными источниками питания применяются экранированные полиэтиленовые коаксиальные кабели. Полиэтиленовые кабели имеют отличные характеристики диэлектрической изоляции высокого напряжения в небольшом, но прочном формфакторе. Экранирующий проводник в коаксиальном кабеле работает как «клетка Фарадея» для центрального проводника, находящегося под высоким потенциалом. В случае повреждения главного изолятора ток высокого напряжения пойдет по заземленному защитному проводнику, окружающему главный изолятор. Данная внутренне присущая функция безопасности — одно из преимуществ применения выходного коаксиального высоковольтного кабеля.

Кабель RG8-U уже в течение продолжительного времени используется в отрасли высоковольтных устройств в качестве выходного высоковольтного кабеля. Существует вариант кабеля RG8-U, в котором применен сплошной полиэтиленовый сердечник. Технические характеристики этого кабеля не определяют его параметры по «высоким напряжениям», так как он специально не создавался для использования при высоких напряжениях. Таким образом, фактически для RG8-U не существует классификации по напряжению. Долгое время ряд участников отрасли высоковольтного оборудования использовали этот кабель при напряжениях 20, 30 кВ и даже выше. Компания Spellman использует кабель RG8-U, но ограничивает его применение теми областями, в которых напряжение не превышает 15 кВ.

Для напряжений свыше 15 кВ, где желательно использовать коаксиальный полиэтиленовый кабель, компания Spellman применяет кабели, специально разработанные и изготовленные для эксплуатации при высоких напряжениях.

Эти кабели, в общем, имеют ту же конструкцию, которая описана выше, однако отличаются увеличенным диаметром центрального слоя изоляционного материала, позволяющим достичь необходимых характеристик диэлектрической изоляции. Зачастую в других модификациях кабеля, предназначенных для более высоких напряжений, используется тонкий полупроводниковый экран для защиты от коронного разряда. Этот противокоронный защитный экран располагается между центральным металлическим проводником и главным полиэтиленовым изоляционным сердечником. Данная противокоронная защита помогает сглаживать геометрические градиенты напряжения проводника, сокращая, таким образом, образование коронных разрядов.

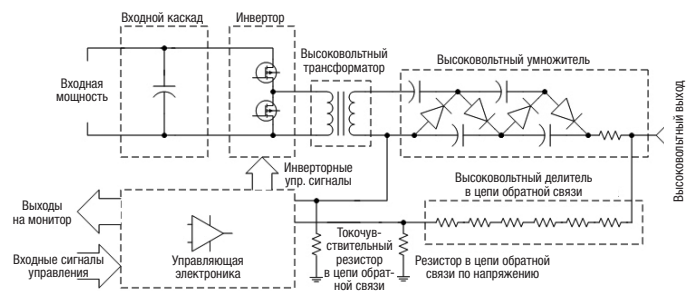
Качество высоковольтного кабеля и его соединителей зависит от качества использованных для его производства

материалов. Применение кабелей, которые были специально разработаны, определены и проверены для работы при высоких напряжениях, гарантирует использование материалов в соответствии с руководствами по проектированию.

## УП-08

**Как изменить полярность блока питания?**

В большинстве высоковольтных блоков питания для создания необходимого выходного напряжения применяются так называемые умножители напряжения. Основная схема умножителя показана ниже на упрощенной принципиальной схеме блока питания:



Упрощенная схема высоковольтного источника питания

Схема умножителя состоит из конденсаторов и диодов, расположенных в определенном порядке. Полярность на выходе блока определяется ориентацией диодов. В вышеприведенном примере диоды должны создавать на выходе положительную полярность относительно земли. Если поменять ориентацию всех диодов, умножитель будет выдавать отрицательное напряжение относительно земли.

В вышеприведенном примере показан двухступенчатый однополупериодный умножитель, в котором используются четыре диода. Двухполупериодные каскады умножителей более эффективны, в них используются дополнительные конденсаторы и в два раза больше диодов. Для создания высоких напряжений, таких как в блоках питания Spellman, последовательно соединяют большое количество каскадов умножения. 12-каскадный двухполупериодный умножитель будет содержать 48 диодов.

Как правило, используемые для сборки умножителей конденсаторы и диоды впаяны прямо в одну, а иногда в несколько печатных плат. Часто в целях изоляции от высоких напряжений такие платы заключаются в оболочку — заливаются компаундом.

Для упрощения процедуры изменения полярности на противоположную (как в экземпляре серии SL) при напряжениях выше 8 кВ предусмотрен второй умножитель — «противоположной полярности». Процесс замены умножителя не представляет трудностей, необходимы лишь отвертка и несколько минут времени. Из-за упрощенной конструкции блоков, в модульном исполнении они, как правило, не допускают изменения полярности прямо на месте эксплуатации.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

УП-09

**Почему источникам питания требуется время для прогрева?**

В большинстве высоковольтных блоков питания для создания необходимого выходного напряжения применяются так называемые умножители напряжения. Основная схема умножителя показана ниже на упрощенной принципиальной схеме блока питания:

Источникам питания обычно необходим интервал времени, по окончании которого стабилизируются технические характеристики. С точки зрения функциональности устройство начинает работу сразу же после его включения. Но если для вашего применения требуется очень стабильный выход, дайте источнику питания прогреться и достичь «теплого равновесия», чтобы исключить температурный дрейф, который подробно описан ниже.

Управление и регулирование в источнике питания выполняется посредством выборки на высоковольтном выходе с использованием делителя высокого напряжения в цепи обратной связи. Цепь этого делителя состоит из ряда соединенных последовательно высоковольтных резисторов с высоким импедансом. Один конец делителя соединен с высоковольтным выходом источника питания; другой соединяется с землей через масштабирующий резистор, создающий сигнал низкого напряжения, пропорционального измеряемому высокому напряжению на выходе. Обычно вырабатывается сигнал обратной связи 0–10 В пост. тока, что соответствует 0–100% напряжения на выходе источника питания.

Ветвь делителя обратной связи чувствительна к изменениям температуры. Эти влияния учитываются с помощью так называемого «температурного коэффициента» (ТС), который обычно указывают в частях на миллион на градус Цельсия. Типичным значением температурного коэффициента может быть 150 млн–1/°C. Для этого случая при изменении температуры значение импеданса резистора изменяется в соотношении  $(150/1\,000\,000) = 0,00015$ , или 0,015% на каждый градус Цельсия, которое воспринимает делитель в цепи обратной связи.

Рассмотрим пример реального источника питания.

Для **SL50P300 TC** = 100 млн–1/°C  $(100/1\,000\,000) = 0,0001$  или 0,01% (0,01%) (50 кВ) = 5 В

Так, для каждого изменения на один градус Цельсия, воспринимаемого делителем в цепи обратной связи, пропорциональное изменение напряжения на выходе источника питания будет  $\leq 5$  В.

Если источник питания остается без использования в течение продолжительного периода времени, можно принять, что компоненты внутри источника находятся при комнатной температуре окружающей среды. Для иллюстрации примем комнатную температуру равной 22 °C (приблизительно 71,5 °F) и допустим, что во время испытания комнатная температура остается постоянной.

Источник питания должен находиться во включенном состоянии и быть настроен на работу при максимальном напряжении и токе. Имеют место два основных эффекта.

1. На делитель в цепи обратной связи влияют его собственные тепловые потери  $I^2R$ , выделяемые при прохождении тока обратной связи через резисторы делителя.
2. Другие компоненты в источнике питания также выделяют тепло, вследствие этого начинает подниматься температура внутри самого источника питания, что повышает температуру ветви делителя обратной связи.

После достаточно продолжительного интервала времени источник питания достигает нового теплового равновесия. Для этого примера допустим, что температура ветви делителя обратной связи теперь равна 28 °C (приблизительно 82,5 °F), то есть изменилась на 6 °C.

Нам известно, что в нашем примере для делителя в цепи обратной связи задано изменение  $\leq 0,01\%$  (или  $\leq 5$  В) при изменении температуры на каждый градус Цельсия. Потому полное изменение, которое следует ожидать, составит:  $(5 \text{ В}/^\circ\text{C}) (6 \text{ }^\circ\text{C}) = \leq 30 \text{ В}$

В общем, это небольшая часть в сравнении со значением максимального выходного напряжения, но в некоторых критических применениях она может быть существенна.

**Каков интервал времени, в течение которого происходит это изменение?**

Он большей частью зависит от свойств действительной физической конструкции самого источника питания. Удельная теплоемкость компонентов устройства, характеристики внутренней теплопередачи, поток воздуха внутрь оболочки и наружу, и конструкция умножителя в частности заметно влияют на соответствующие тепловые постоянные времени.

УП-10

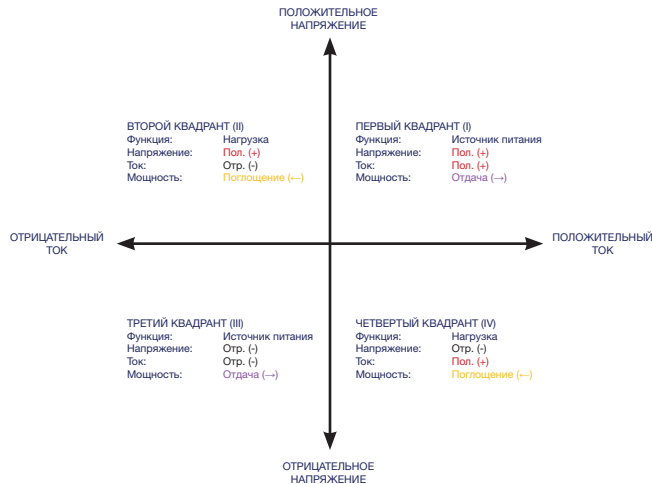
**Фиксированная полярность, реверсивная полярность, четырехквadrантный режим...**

Большинство продукции Spellman и продаж составляют высоковольтные источники питания постоянного тока. Источники питания постоянного тока имеют некоторые фундаментальные ограничения в отношении их рабочих возможностей. Для понимания возможностей типичного высоковольтного источника питания постоянного тока в отношении выходного напряжения, тока и мощности будет полезно использовать декартову систему координат, как показано на рисунке ниже.



УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

УП-10 (продолжение)



Выходные ток и напряжение показаны на соответствующих горизонтальной и вертикальной осях, образующих четыре рабочих квадранта.

Первый и третий квадранты представляют характерные рабочие параметры источника питания, когда мощность отдается на выход. Первый квадрант соответствует положительной полярности на выходе источника питания, а третий — отрицательной полярности на выходе источника питания.

Второй и четвертый квадранты представляют характеристические параметры нагрузки, когда мощность на выходе поглощается. Эта область обычно не является рабочей областью выпускаемых компанией Spellman стандартных высоковольтных источников питания напряжения постоянного тока.

Большинство выпускаемых компанией Spellman источников питания имеют возможность изменять полярность их выхода путем или изменения соединений проводов, или полной замены выходной секции высокого напряжения при необходимости. Вследствие этого наши устройства не способны к ровному и плавному управлению переходом через нуль и обратно и между первым и третьим квадрантами. Даже устройствам нашей серии CZE, имеющим законченные отдельные секции с положительным и отрицательным выходом и используемым для изменения полярности выхода реле высокого напряжения, все же требуется полный спад выходного напряжения до нуля перед осуществлением изменения полярности.

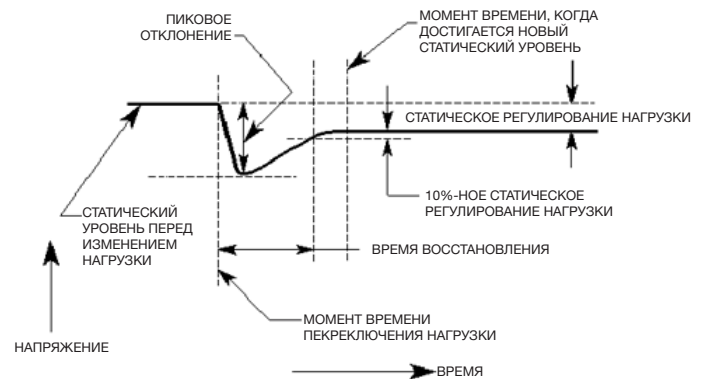
УП-11

**Характеристики динамической нагрузки высоковольтного источника питания**

Конструкция высокочастотных импульсных источников питания компании Spellman обеспечивает их минимальную выходную емкость. Динамические изменения нагрузки способны быстро разряжать выходную емкость, что приводит к падению выходного напряжения вне заданных в технических условиях пределов статического регулирования. Даже если приращение нагрузки потребляет ток в пределах номинального тока источника питания, возможно некоторое «снижение» выходного напряжения. Это снижение воспринимается делителем напряжения в цепи обратной связи, в результате чего контур регулирования напряжения направляет источнику питания команду увеличить выходное напряжение, чтобы вернуть его значение в заданные техническими условиями пределы статического регулирования. Процесс регулирования требует определенного времени. Обычно время восстановления источников питания Spellman (при задании и измерении) имеет порядок от единиц до десятков миллисекунд.

На значение спада в основном влияют следующие параметры:

1. Емкость выходной секции источника питания и любая внешняя паразитная емкость или емкость нагрузки
2. Абсолютное значение тока нагрузки, потребляемого от источника питания
3. Длительность приращения нагрузки



Интервал времени восстановления формы напряжения и вид регулирования (недостаточное, чрезмерное или критическое демпфирование) зависят от указанных выше параметров и от характеристик компенсации, присущих контурам регулирования напряжения и тока самого источника питания.

**Отклик источника питания**

Значения компенсации в контуре выбирают для таких разнообразных характеристик работы, как динамическое восстановление, подавление пульсаций и полные запасы устойчивости источника питания. Все эти характеристики взаимосвязаны, и изменение компенсационных значений

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-11 (продолжение)

в контуре для улучшения одной категории характеристик работы может негативно влиять на другие характеристики. При выборе значений компенсации для контура в своих стандартных источниках питания компания Spellman обычно делает упор на общую стабильность источников питания и характеристики пульсации, поскольку обыкновенно динамические характеристики не указываются. Если требуются специальные характеристики восстановления при динамической нагрузке, то такой уникальный источник питания необходимо будет построить с проведением при разработке испытаний для определения базовых технических условий, из которых будут исходить при определении возможности выполнения требований заказчика.

При получении запросов заказчиков о характеристиках восстановления при динамической нагрузке важно точно знать характер применения устройства. Кроме того, нам необходимо знать, каким образом будут измерять и определять характеристики реакции на динамическую нагрузку. Обычно время восстановления напряжения определяется в диапазоне от 10 до 90 % с указанием максимального допустимого выброса номинального напряжения в процентах. Другие методы тоже приемлемы, если Spellman и заказчик согласовывают способы измерения и определения характеристик.

Выполнение этого типа измерений отклика на динамическую нагрузку может потребовать специального испытательного оборудования, например, стендов динамической нагрузки, способных посылать электронные импульсы включения и выключения нагрузки для получения формы отклика при восстановлении напряжения. В зависимости от выходного напряжения источника питания, его тока и мощности, изготовление таких испытательных стендов для динамической нагрузки может представлять собой не требующую значительных затрат и сравнительно простую задачу или оказаться исключительно дорогостоящим, и в силу этого практически нереализуемым, крайне сложным инженерным решением.

При наличии специальных требований к отклику источника питания на динамическую нагрузку необходимо указать их в первоначальном заказе, поскольку в наших стандартных каталогах продуктов динамические технические характеристики не указываются. Группа проектирования Spellman рассмотрит ваши требования и направит вам предложение с указанием типа оборудования, которое наша компания сможет поставить.

## УП-12

**Преимущество использования источника тока для питания цепей накала рентгеновских трубок**

Практически все системы обеспечения энергии накала, которые Spellman использует в рентгеновских генераторах и рентгеновских источниках Monoblock<sup>®</sup> X-Ray, являются источниками тока, а не напряжения. То есть, такая система контролирует и регулирует ток через нить накала рентгеновской трубки. Это делается для защиты нити накала и достижения максимально возможного срока службы рентгеновской трубки.

При использовании источника напряжения в системе обеспечения энергии накала, ток через нить накала зависит от импеданса цепи. Холодные нити накала имеют низкий импеданс, а по мере их нагрева он увеличивается. Таким образом, если нить накала работает от источника напряжения, при включении питания обычно возникают большие всплески тока. Именно поэтому лампы накаливания в квартире обыкновенно перегорают в начальный момент включения.

При использовании источника тока для системы обеспечения энергии накала, проходящий через нить накала ток постоянно регулируется независимо от импеданса нагрузки. Практически, даже при коротком замыкании на выходе ток все же будет регулироваться и ограничиваться до безопасного уровня.

В этом сценарии регулирования «напряжение» не имеет критически важного значения. Оно лишь обеспечивает соответствие цепи и не более того. Каким бы ни был импеданс цепи (сопротивление нити, сопротивление кабеля и разъема и т.д.), умножение его на протекающий по цепи ток дает напряжение. До тех пор пока источник тока системы обеспечения энергии накала имеет больший диапазон регулирования напряжения, чем требует вся цепь, все идет хорошо.

Единственным случаем, когда вступает в работу «цепь ограничения напряжения», является обрыв нити накала. В этом случае цепь нити разомкнута, генерация рентгеновских лучей невозможна и рентгеновскую трубку требуется заменить. Имеет ли значение, какое при разрыве нити накала будет напряжение в кабеле цепи нити накала? 6 вольт или 12 вольт? Нет, это абсолютно не важно. Нить разорвана, и рентгеновская трубка не может работать именно по этой причине.

Поэтому нас не особенно интересуют предельные значения напряжения в системах обеспечения энергии накала. Пока диапазон регулирования этого напряжения достаточен для обеспечения тока через полезную нагрузку нити накала, все идет хорошо. Если нить сгорит, максимальное напряжение питания разомкнутой цепи будет ограничено до безопасного и предсказуемого уровня. При использовании источника тока в системе обеспечения энергии накала настройки предельного напряжения цепи не обеспечивают реальной дополнительной защиты или преимуществ для рентгеновской трубки.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-13

**Схема защиты от возникновения дугового разряда и внешние последовательные ограничивающие резисторы**

Источники питания Spellman с функциями защиты от возникновения дугового разряда обнаруживают токи дугового разряда посредством быстродействующего чувствительного трансформатора тока, работающего в нижней части диапазона обратного провода цепи умножителя. Эта цепь преобразует фактически измеренный разрядный ток короткого замыкания в пропорциональный сигнал напряжения, после чего по уровню определяется возникновение дугового разряда.

Необходимо обеспечить селективность, чтобы обычные зарядные токи умножителя не оказывали влияния на цепи обнаружения дугового разряда, что могло бы мешать нормальной работе. Назначение схемы защиты от возникновения дугового разряда — предотвратить разрушение ограничивающих резисторов источника питания в результате продолжительных дуговых разрядов. Наша цепь обнаружения дугового разряда достаточна проста, не обладает большой точностью, а также не предназначена и не разработана для реагирования на каждое событие возможного дугового разряда.

Последовательные ограничивающие резисторы в блоке умножителя ограничивают разрядный ток короткого замыкания до безопасных предсказуемых уровней. Зная эти уровни, Spellman может задать точки аварийного отключения цепи обнаружения дугового разряда, которые защитят источники питания от избыточных дуговых разрядов и обеспечат их нормальную работу.

Если заказчик включает внешний ограничивающий резистор с большим сопротивлением последовательно с выходом источника питания, это может фактически привести к прекращению срабатываний схемы защиты от дугового разряда. Это происходит в результате того, что при наличии внешнего ограничивающего резистора разрядный ток короткого замыкания может снизиться значительно ниже порога обнаружения.

С точки зрения источника питания это благоприятная ситуация, т. к. этим ограничивается воздействие перегрузки на наши внутренние ограничивающие резисторы короткого замыкания, которые мы и пытаемся защитить с помощью схемы защиты от дуги. Разрядные токи короткого замыкания снижаются, рассеяние мощности во внутренних выходных ограничителях уменьшается. Таким образом, предусматриваемые заказчиком внешние средства ограничения тока короткого замыкания обычно играют положительную роль в работе источников питания.

Существуют некоторые особенные условия, когда непрерывный дуговой разряд при определенных применениях значительно превышает конструктивные возможности высоковольтного источника питания. В этих ситуациях внешний ограничивающий резистор заказчика может оказаться приемлемым решением этой проблемы. Spellman может

даже спроектировать под заказ источник питания, чтобы осуществлять регулирование на «дальней стороне» или в выходном узле обеспечиваемого заказчиком внешнего ограничивающего резистора, эффективно предотвращая любое падение напряжения.

Если в вашей области применения необходимы особые средства защиты от дуги, превосходящие возможности стандартных блоков, необходимо обсудить ваши требования с компанией Spellman для определения типа оборудования, которое наша компания сможет поставить.

## УП-14

**Ограничения цифровых измерительных приборов передней панели**

Большинство устанавливаемых в стойке высоковольтных источников напряжения и рентгеновских генераторов Spellman имеют полностью представляющие их возможности передние панели в комплекте с цифровыми измерительными приборами для отображения выходных напряжения и тока. Эти измерительные приборы предназначены для использования в качестве непрецизионных индикаторов функционального состояния источника питания. По причине присущих им ограничений (описаны ниже) не рекомендуется использовать расположенные на передней панели измерительные приборы в качестве средств измерений для получения показаний в целях прецизионного управления процессом, особенно при низких показаниях значений сигналов.

**Требования к максимальному напряжению на входе цифрового измерительного прибора**

Серия применяемых цифровых измерительных приборов использует входной сигнал с напряжением 0–2 В пост. тока. 2 В пост. тока — это наибольший входной сигнал, воспринимаемый этими измерительными приборами. Для программирования и контроля высоковольтных источников питания компания Spellman применяет сигнал программирования с напряжением 0–10 В пост. тока. Это означает, что для того, чтобы было возможно отображать вырабатываемые цепью обратной связи источника питания сигналы контроля напряжения и тока с напряжением 0–10 В пост. тока, их необходимо с помощью делителя понижать до 2 В пост. тока или меньше. Применение делителя сигнала ослабляет его по сравнению с собственным шумом цепи и помехами, что приводит к уменьшению отношения сигнал/шум.

**Ослабление сигнала**

Источник питания 30 кВ будет иметь сигнал контроля напряжения с полной шкалой 10 В пост. тока, выводимый на расположенный на задней панели разъем сопряжения. Однако для того, чтобы обеспечить правильные показания цифрового измерительного прибора передней панели, этот 10-вольтный сигнал следует ослабить до 300 мВ. Да, до 300 мВ, потому что 10 В пост. тока невозможно правильно отобразить

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-14 (продолжение)

на цифровом измерительном приборе, и деление сигнала 10 В пост. тока до 3 В пост. тока даст все еще слишком большое значение для приборов с максимальным входным напряжением 2 В пост. тока.

**Отношение сигнал/шум**

Шум присутствует в большинстве электрических систем. Он представляет собой фоновый «сигнал» низкого уровня, который возникает в результате работы регуляторов с коммутацией, цепей синхронизации и тому подобных. Идеально желателен нулевой шум, но некоторое его количество всегда присутствует, и с ним приходится иметь дело. Для импульсных источников питания фоновый шум с напряжением 25 мВ в аналоговых линиях контроля совершенно обычен. В общем случае желательно иметь сигнал как можно больший по сравнению с шумом, чтобы обеспечить наибольшее отношение сигнал/шум.

**Пример**

Для расположенного на задней панели контрольного выхода с полной шкалой 10 В пост. тока:

$10 \text{ В}/25 \text{ мВ} = 400$ , сигнал в 400 раз превосходит шум

Для расположенного на передней панели цифрового измерительного прибора с полной шкалой 300 мВ:

$300 \text{ мВ}/25 \text{ мВ} = 12$ , сигнал в 12 раз превосходит шум

Поскольку источник питания работает с выходным напряжением меньше максимального выходного напряжения, отношение сигнал/шум только ухудшается. Получение точных, с высокой повторяемостью, результатов при очень малых относительно максимального номинального выходного значения сигналах может представлять значительные трудности вплоть до прямой невозможности в отдельных случаях.

**Точность измерительных приборов**

Серия используемых на передней панели измерительных приборов имеет типовую точность  $2\% \pm 1$  младший двоичный разряд. Показания обновляются приблизительно два раза в секунду. Эти характеристики достаточны для обычных измерений в справочных целях, но их нельзя считать достаточными для прецизионных средств измерений.

**Краткие выводы**

По причине сказанного выше в связи с малыми уровнями сигнала, а также собственной непрецизионности измерительных приборов передней панели, использовать эти средства для выполнения важных контрольных измерений не рекомендуется. Использование выводимых на заднюю панель источника питания контрольных сигналов с полной шкалой 0–10 В пост. тока вместе с внешним высокопрецизионным измерительным прибором с 5,5- или 6,5-разрядным индикатором обеспечит наилучший вариант для измерений характеристик источника питания.

## УП-15

**Пояснение к 3,5- и 4,5-разрядным индикаторам измерительных приборов****Полный разряд**

Для цифровых измерительных приборов типично описание возможности «половины разряда». Полный разряд означает возможность выводить все цифры от 0 до 9, то есть 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, и 9.

**Половина разряда**

Половина разряда способна отображать только цифру 1. Половина разряда всегда представляет первую показываемую цифру. Так как половина разряда по существу представляет только «1», она имеет ограниченное возможное применение.

**Десятичный разделитель**

Десятичный разделитель представлен простым «точечным» сегментом, который вручную воспроизводится после требуемого цифрового сегмента, чтобы полностью показывать соответствующее требуемое число. Разделитель можно показывать после любого требуемого числа, обычно посредством установки переключки. Если переключка не установлена, никакие разделители отображаться не будут.

**Пример 3,5-разрядного отображения**

3,5-разрядный индикатор представлен четырьмя сегментами: одной половиной разряда и тремя полными разрядами. Его максимальное возможное показание составляет 1999. Если потребуются отобразить 30 кВ на 3,5-разрядном индикаторе измерительного прибора, нужно будет «отбросить» переднюю половину разряда по причине невозможности ее использовать, так как это всего лишь «1». Мы ограничены использованием трех полных разрядов, поэтому отображение будет 300. Десятичный разделитель устанавливается вручную с помощью переключки, поэтому окончательное отображение будет 30,0, а часть «кВ» будет изображаться на накладке передней панели.

Если на 3,5-разрядном индикаторе измерительного прибора потребуются отображать 10 кВ, можно будет использовать переднюю половину разряда. В этом случае мы будем располагать разрешением в четыре разряда, с показанием прибора 1 000. После правильного расположения разделителя окончательное отображение прибора будет 10,00 с изображением на накладке передней панели части «кВ».

**Пример 4,5-разрядного отображения**

Если заказана опция DPM4, стандартные 3,5-разрядные измерительные приборы заменяются 4,5-разрядными приборами. А 4,5-разрядный дисплей представлен пятью сегментами: одной половиной разряда и четырьмя полными разрядами. Его максимальное возможное показание составляет 19 999.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-15 (продолжение)

Используя аналогию с приведенными выше примерами, если потребуется отобразить 30 кВ на 4,5-разрядном индикаторе измерительного прибора, нужно будет «отбросить» переднюю половину разряда по причине невозможности ее использовать, так как это всего лишь «1». Мы ограничены использованием трех полных разрядов, поэтому отображение будет 3000. Десятичный разделитель устанавливается вручную с помощью переключки, поэтому окончательное отображение будет 30,00, а часть «kV» будет изображаться на накладке передней панели.

Если на 4,5-разрядном индикаторе измерительного прибора потребуется отображать 10 кВ, можно будет использовать переднюю половину разряда. В этом случае мы будем располагать разрешением в четыре разряда, с показанием прибора 10000. После правильного расположения разделителя окончательное отображение прибора будет 10,000 с изображением на накладке передней панели части «kV».

**2, 20, 200, 2000 — особый случай**

Вследствие требования максимального входного напряжения 2 В пост. тока для используемого измерительного прибора, возникает особая ситуация в случае, скажем, 20-киловольтного устройства. Можно взять сигнал с полной шкалой 10 В пост. тока, с помощью делителя уменьшить до 200 мВ и получить... 20,0 кВ максимум для разрешения в три разряда. Однако существует способ «закроить» еще один разряд разрешения для 20-киловольтного устройства.

Если сигнал контроля напряжения с полной шкалой 10 В пост. тока с помощью делителя уменьшить до 2 В пост. тока, то для подавляющей части диапазона отображения будет получено разрешение в четыре разряда или 19,99 кВ в качестве максимального отображаемого значения. Единственным недостатком будет то, что если устройство запрограммировано на значения больше 19,99 кВ, измерительный прибор будет «зашкаливать» и отображать передний разряд «1», а все остальные разряды пустыми. В этом состоянии нет ничего неправильного; это просто следствие поступления на измерительный прибор передней панели сигнала большего, чем 2 В пост. тока.

## УП-16

**Возможности параллельной работы устройств серии ST**

Стандартное устройство серии ST представляет собой одинарный высоковольтный источник питания с номинальным напряжением 12 кВ и высотой 6U. Когда требуются высокие уровни мощности, серия ST предназначена обеспечивать добавочную мощность путем параллельного включения дополнительных блоков для создания конфигурации ведущий/ведомый. В этом случае можно получить высоковольтное питание мощностью 100 кВт и выше.

Шасси ведущего устройства является точкой сопряжения с оборудованием заказчика; такая сборная система эффективно работает как единый источник питания. Ведущее устройство сохраняет полную функциональность передней панели, а у ведомых передние панели глухие.

Такая компоновка ведущий/ведомый в фабричной конфигурации необходима вследствие невозможности параллельного включения нескольких независимых источников. Существует три основных типа устройств ST в зависимости от особенностей их функционирования:

**Стандартное устройство**

Стандартное устройство ST представлено отдельным шасси высотой 6U, номиналом 12 кВ согласно детализации в листе данных. Это устройство, выполненное на отдельном шасси, снабжено полностью представляющей его возможности передней панелью, не имеет возможности работы в параллельном включении и имеет ограничение 12 кВ для выходной мощности.

**Ведущее устройство**

Ведущее устройство внешне выглядит очень похожим на стандартное, но имеет значительные отличия, так как его конфигурация (аппаратная и программная) предусматривает функционирование в качестве управляющего в компоновке ведущий/ведомый.

Шасси ведущего устройства должно пройти фабричную настройку и испытания, чтобы иметь возможность управления точно известной компоновкой ведомых устройств. Ведущее устройство предназначено для работы с полным комплектом ведомых устройств в соответствии с исходной фабричной конфигурацией. Возможна работа ведущего устройства с меньшим, чем полный комплект числом ведомых устройств или даже самостоятельная, но это приведет к изменению допустимой мощности, программируемых возможностей и масштабирующих коэффициентов обратной связи.

**Ведомое устройство**

Ведомое устройство обычно можно определить по пустой передней панели. Ведомое устройство не может работать самостоятельно, так как его фабричная аппаратная и микропрограммная настройка предусматривает работу в качестве части предварительно скомпонованной системы ведущее/ведомое устройство.

## УП-17

**Пояснение относительно разрешения настройки высоковольтных источников питания**

Большинство выпускаемых компанией Spellman высоковольтных источников питания — настраиваемые, то есть пользователь обычно может настраивать любое напряжение (или ток) как правило на всех выходах от нуля до 100 %

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-17 (продолжение)

номинального значения. Эта настройка обычно выполняется с использованием одной из следующих возможностей.

- Местное управление с передней панели
- Дистанционное управление посредством аналогового сигнала
- Дистанционное управление посредством цифрового сигнала

**Местное управление с передней панели**

Местным управлением называется использование располагаемого на плате потенциометра (потенциометров) для настройки значения выходного напряжения или тока. Некоторые модули (серии MPS, PCM, SLM и т.д.) снабжены потенциометрами, к которым возможен доступ, позволяющими пользователю настраивать выходное напряжение или ток. Большинство выпускаемых компанией Spellman устройств в стойечном исполнении имеют переднюю панель с полным выводом набора возможностей, на которой предусмотрены дисковые регуляторы с блокировкой несанкционированного изменения для установки требуемого значения выходного напряжения или тока.

Поэтому, если схема управления источником питания является аналоговой, а для настройки источника питания используются потенциометры (потенциометры) на передней панели, получаемое разрешение настройки определяется этими потенциометрами.

Движок керметовых (металлокерамических) или полимерных пленочных потенциометров позволяет устанавливать более близкое к требуемому значение, так как резистивный элемент обладает непрерывной контактной поверхностью в отличие от дискретных витков в проволочных потенциометрах, существенно ограничивающих разрешение.

В большинстве модульных источников питания с возможностью местной настройки используются керметовые или полимерные пленочные потенциометры, потому что с технической точки зрения эти устройства имеют «разрешающую способность, близкую к неограниченной», как указывает изготовитель. В большинстве устройств стойечного исполнения используется десятиоборотный проволочный потенциометр Bourns 3590 номиналом 5 кОм, имеющий разрешение 0,025 % согласно техническим характеристикам.

Если источник питания в модульном или стойечном исполнении имеет стандартный цифровой интерфейс (RS-232, Ethernet или USB), схема управления источником питания является по сути цифровой. Даже если для управления источником питания используется вырабатываемый передней панелью аналоговый сигнал, этот сигнал будет преобразовываться в цифровой вид с дискретизацией, свойственной цифровому интерфейсу и схеме управления.

**Дистанционное управление посредством аналогового сигнала**

Если схема управления источником питания аналоговая и для настройки источника питания используется аналоговый

сигнал, получаемое разрешение настройки будет определяться этим создаваемым пользователем сигналом.

Если источник питания в модульном или стойечном исполнении имеет стандартный цифровой интерфейс (RS-232, Ethernet или USB), схема управления источником питания является по сути цифровой. Даже если в источник питания подается аналоговый сигнал, этот сигнал будет преобразовываться в цифровой вид с дискретизацией, свойственным цифровому интерфейсу и цепям управления. Поэтому ограничение разрешения может определяться или создаваемым пользователем аналоговым сигналом, или дискретизацией источника питания — что больше.

**Дистанционное управление посредством цифрового сигнала**

Если источник питания в модульном или стойечном исполнении имеет стандартный цифровой интерфейс (RS-232, Ethernet или USB), схема управления источником питания является по сути цифровой. Настройка источника питания через один из цифровых интерфейсов будет в результате давать разрешение, ограниченное дискретизацией, свойственной цифровым цепям и цепям управления источником питания.

## УП-18

**Токовая петля / схема обнаружения дугового разряда****Обратная связь по току / Токовая петля**

Способ обнаружения дугового разряда источниками питания Spellman никак не связан с обратной связью по току и управляющей токовой петлей.

Перегрузка по току — это длительное состояние отказа в цепи с низким полным сопротивлением, которое может сохраняться в течение продолжительного периода времени. Источники питания обнаруживают его за счет обратной связи по току и переключаются из режима постоянного напряжения в режим постоянного тока для приведения непрерывного постоянного тока к уровню, заданному входящим управляющим сигналом. Константы времени, связанные с цепью обратной связи по току и усилителю ошибок по силе тока, обычно равны нескольким миллисекундам или десяткам миллисекунд, поэтому мы не используем обратную связь по току для обнаружения дугового разряда. Обратная связь по току используется только для регулирования долговременного постоянного тока в соответствии с токовой петлей.

**Характеристики дуговых разрядов**

Дуговые разряды характеризуются очень низким сопротивлением, которое может возникнуть очень быстро и существовать всего лишь несколько, несколько десятков или сотен микросекунд. При возникновении такой ситуации, если рассматривать ее в отношении источника питания, то в принципе происходит ёмкостный разряд. У нас есть заряженный конденсатор (собственная емкость умножителя источника питания), к выходу которого подключен элемент

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-18 (продолжение)

с очень низким сопротивлением. Единственным ограничивающим силу тока фактором при этом будет внутренняя последовательная ограничительная схема (обычно состоящая из резисторов и (или) катушек индуктивности). При отсутствии каких-либо технических мер по ограничению сила тока дугового разряда в теоретическом построении была бы бесконечно велика, но внутренние ограничивающие резисторы в наших устройствах удерживают силу тока на уровне безопасного разряда. По цепям высоковольтного источника питания, номинальная сила тока которого исчисляется миллиамперами, в момент дугового разряда может протекать ток силой в амперы или даже десятки ампер. Это НЕ обычный номинальный ток, а разрядный ток дугового разряда, и разница между этими явлениями очень велика.

**Токочувствительный трансформатор**

Из-за коротких промежутков времени и большой силы тока, возникающей в момент дугового разряда, Spellman использует другое средство для обнаружения дуговых разрядов — токочувствительный трансформатор. Токочувствительный трансформатор подключается к выходу схемы умножителя. Он не обнаруживает обычный постоянный ток малой силы, являющийся номинальным для источника питания, но обнаруживает дуговой разряд, сила тока которого очень велика, а продолжительность измеряется микросекундами. Таким образом мы обнаруживаем дуговой разряд.

**Процесс гашения дугового разряда**

Процесс гашения дугового разряда необходим, потому что любая накопленная в умножителе энергия излучается в виде тепла в блоке выходных ограничителей. Отдельные дуговые разряды не приводят к повреждению источника питания, однако повторяющиеся продолжительные дуговые разряды могут привести к перегреву схемы выходных ограничителей. После некоторого количества дуговых разрядов в течение определенного времени произойдет повреждение источника питания вследствие перегрева. Процесс гашения дугового разряда в наших устройствах предотвращает какие-либо повреждения. Изменить характер явления, которое мы называем дуговым разрядом, невозможно; Spellman определяет уровень чувствительности, достаточный для защиты источника питания, который в то же время не мешает нормальной эксплуатации устройства.

**Для чего не предназначена схема защиты от дугового разряда**

Процесс обнаружения и прерывания дугового разряда в устройствах Spellman служит для защиты источника питания от чрезмерного долговременного воздействия дуговых разрядов; он не предназначен для высокоточной работы и непрерывной регулировки схемы пользователем. Если заказчику требуется высокоточное регулируемое обнаружение дуговых разрядов, Spellman рекомендует реализовать его самостоятельно при помощи внешнего токочувствительного трансформатора. Таким образом будет сохранена необходимая источнику питания защита от дуговых разрядов,

а заказчик получит возможность настроить внешний трансформатор для обнаружения дугового разряда в соответствии со своими потребностями.

## УП-19

**Чем короче, тем лучше: о длине кабелей высокого напряжения**

В большинстве источников питания высокого напряжения компании Spellman используется тот или иной вид кабеля для подключения выхода источника питания высокого напряжения к «нагрузке» клиента. Используемые кабели часто являются коаксиальными. Коаксиальный кабель обладает встроенной защитой благодаря заземленной экранирующей оболочке, а также обеспечивает шумоподавление и хорошее соединение заземления между источником питания и нагрузкой.

Однако коаксиальный кабель увеличивает емкость выходной цепи. В зависимости от типа коаксиального кабеля, емкость может составлять 30 пФ или более на фут (100 пФ/м) длины высоковольтного кабеля. При очень высоком напряжении, которое выдают источники питания компании Spellman, даже незначительная электрическая емкость может накапливать большое количество энергии. Накопленная в конденсаторе энергия рассчитывается по формуле:

$$\text{накопленная энергия (в джоулях)} = \frac{1}{2} CU^2, \text{ где } C — \text{его емкость, а } U — \text{приложенное напряжение.}$$

Отсюда очевидно, что даже небольшая емкость при высоком напряжении может накапливать большое количество энергии, поскольку при увеличении напряжения емкость возрастает квадратично. В некоторых случаях кабель высокого напряжения накапливает энергию, превышающую выходную емкость источника питания.

Эта емкость кабеля рассматривается как внешняя емкость относительно источника питания. Источнику питания необходимо зарядить подключенную к нему емкость, и в определенных случаях это может вызвать проблемы. Однако настоящая проблема появляется при возникновении дугового разряда. Учитывая расположение обладающего емкостью кабеля, последовательно подключенный резистор, который рассеивал бы накопленную энергию, отсутствует. Источник питания оснащен встроенными в выходной контур резисторами, ограничивающими силу тока дугового разряда до безопасного и предсказуемого уровня. Емкость кабеля не имеет такого ограничения, поэтому ток дугового разряда может иметь огромную силу, а количество энергии может привести к циклическому изменению напряжения, способному повредить как кабель, так и источник питания. В конечном итоге энергия будет рассеяна дуговым сопротивлением и другими рассеивающими элементами, но это произойдет уже после возникновения циклических скачков напряжения. При этом также возможно повреждение чувствительного оборудования клиента и разрушительные последствия для оборудования без надлежащего заземления.

Поэтому рекомендуется по возможности использовать как можно более короткие кабели высокого напряжения. Значит

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

ли это, что с источником питания нельзя использовать длинный кабель? Нет. Но, при прочих равных условиях, конфигурация с коротким кабелем высокого напряжения с меньшей вероятностью вызовет проблемы, чем та же конфигурация с длинным кабелем.

## УП-20

**Заземление высокочастотных переходных токов, возникающих вследствие дуговых разрядов**

Заземление в одной общей точке обычно считается наилучшим вариантом для заземления электрических схем. На бумаге, в упрощенном построении схемы, все выглядит очень логично. Однако в реальной жизни очень часто такой вариант заземления не достигает своих целей из-за влияния множества неучтенных нюансов практической реализации.

Кроме того, заземление в общей точке фактически не работает при высоких частотах (в частности, для высокочастотных переходных токов, возникающих вследствие дуговых разрядов), при которых индуктивность путей течения тока и стоячие волны вызывают перепады напряжения. Другим фактором является паразитная конструктивная емкость, устранить которую полностью на практике невозможно. Паразитная емкость может приводить к возникновению трудно предсказуемых альтернативных путей течения тока.

Получается, должным образом работающую схему заземления в общей точке на практике иногда реализовать просто невозможно. Но ведь заземление все равно необходимо, так что же делать? Оптимальным способом для заземления токов высокочастотных высоковольтных дуговых разрядов будет обеспечение наличия путей с малым импедансом для протекания этих токов.

Как это реализуется на практике? Заземляйте все и так часто, как это возможно. Вы правильно поняли, используйте множественные контуры заземления. А как же быть с паразитными контурами с замыканием через землю? — спросите вы. В двух словах: не беспокойтесь о замыкании через землю. Если точек заземления больше одной, такая система уже называется системой с многократным заземлением и единственным верным решением будет обеспечить как можно более низкий импеданс системы заземления.

На практике это достигается использованием широких металлических полос заземления (шин) или, если позволяет конструкция, листов металла. Элементы должны соединяться болтами с малыми интервалами между креплениями. Если нельзя использовать металлическое шасси (раму), единственным вариантом остается использовать кабели. Недостаток метода использования проводов, кабелей и шин заземления — это потенциально очень высокая индуктивность для частот выше звуковых.

Так что не пытайтесь найти единственное идеальное решение конфигурации заземления — циклы его поисков и проверки могут занять слишком много времени. Используйте возможные и неоднократно проверенные практикой решения.

## УП-21

**Как рассчитать максимальную силу переменного тока на входе**

Знать максимальный входной ток источника питания полезно при выборе требований к электросети, аварийному выключателю, кабелю питания переменного тока, разъемам и даже изолирующему трансформатору в схемах с плавающими потенциалами. Рассчитать максимальную силу входного тока довольно просто, зная несколько основных параметров и применив простые математические действия.

**Номинальная мощность источника питания высокого напряжения**

Для всех источников питания компании Spellman указана номинальная максимальная мощность в ваттах. Это первый нужный нам параметр; узнать его можно из техпаспорта изделия. У большей части источников питания компании Spellman максимальная номинальная мощность указана в номере модели. Например, SL30P300/115 — источник питания напряжением 30 кВ с положительной полярностью и максимальной мощностью 300 Вт, работающий от входного напряжения переменного тока 115 В.

**КПД источника питания**

КПД источника питания — отношение мощности на входе к мощности на выходе. КПД обычно указывается в процентном виде или в виде десятичной дроби меньше 1, например, 80 % или 0,8. Чтобы узнать входную мощность, поделим максимальную выходную мощность на КПД:

$$300 \text{ Вт} / 0,8 = 375 \text{ Вт}$$

**Коэффициент мощности**

Коэффициент мощности — отношение активной мощности к полной. Обычно он выражается в виде десятичной дроби меньше 1. Активная мощность указывается в ваттах, а полная — в вольт-амперах (ВА). У однофазных импульсных источников питания без коррекции коэффициент мощности обычно довольно низок, например 0,65. Импульсные источники питания без коррекции обладают более высоким коэффициентом мощности, например 0,85. Блоки питания с активной коррекцией коэффициента мощности могут обладать очень высоким коэффициентом мощности, к примеру 0,98. В приведенном выше примере используется источник питания без коррекции с питанием от однофазной линии, таким образом:

$$375 \text{ Вт} / 0,65 = 577 \text{ ВА}$$

**Напряжение на входе**

Нам необходимо знать входное напряжение переменного тока, для которого предназначен источник питания. В приведенном выше примере оно составляет 115 В. Это номинальное напряжение, оно указывается с допуском  $\pm 10\%$ . Чтобы предусмотреть наихудший случай с низким напряжением в сети, отнимем 10 %:

$$115 \text{ В} - 10\% = 103,5 \text{ В}$$



## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

**Максимальная сила переменного тока на входе**

Взяв 577 ВА и разделив ее на 103,5 В, получаем:

$$577 \text{ ВА} / 103,5 \text{ В} = 5,57 \text{ А}$$

Если напряжение на входе однофазное, наш ответ — 5,57 А.

**Трехфазное входное напряжение**

Источники питания с трехфазным напряжением на входе обладают более высоким коэффициентом мощности, чем однофазные. Кроме того, по причине наличия трех фаз, питающих источник, фазовая сила тока будет меньше. Чтобы узнать силу тока одной фазы, поделим рассчитанную нами силу тока на входе на  $\sqrt{3}$  (1,73).

Рассчитаем данные для следующего примера: STR10N6/208. Из технического паспорта STR узнаем, что максимальная мощность — 6000 Вт, КПД 90 %, а коэффициент мощности 0,85. И хотя STR в силу своей конструкции будет работать с напряжением до 180 В переменного тока, в данном примере его питание будет поступать от трехфазной сети 208 В. Максимальную силу входного тока на одну фазу получаем следующим образом:

КПД источника питания:  
 $6000 \text{ Вт} / 0,9 = 6666 \text{ Вт}$

Коэффициент мощности:  
 $6666 \text{ Вт} / 0,85 = 7843 \text{ ВА}$

Напряжение на входе:  
 $208 \text{ В} - 10 \% = 187 \text{ В}$

Максимальная сила переменного тока на входе:  
 $7843 \text{ ВА} / 187 \text{ В} = 41,94 \text{ А}$  (если бы сеть была однофазной)

Пересчет для трех фаз на входе:  
 $41,94 \text{ А} / \sqrt{3} (1,73) = 24,21 \text{ А}$  на фазу

Таким образом, у нас есть два уравнения, одно для однофазного и одно для трехфазного напряжения на входе:

**Уравнение для максимальной силы однофазного входного тока**

Входной ток = максимальная мощность / (КПД) (коэффициент мощности) (минимальное входное напряжение)

**Уравнение для максимальной силы трехфазного входного тока**

Входной ток = максимальная мощность / (КПД) (коэффициент мощности) (минимальное входное напряжение) ( $\sqrt{3}$ )

Данные расчеты входного тока предусматривают наихудший случай, исходя из того, что источник питания работает на максимальной мощности с низким напряжением в линии, а также с учетом КПД и коэффициента мощности.

**УП-22****Простое испытание режима стабилизации напряжения / тока высоковольтного источника питания****Проблема**

Надлежащее и полное испытание высоковольтного источника питания требует наличия специальной квалификации и оборудования, при этом основной задачей должно быть обеспечение безопасности. Заказчики с «сомнительным» высоковольтным источником питания часто спрашивают, есть ли что-либо, что они могут сделать для простого испытания эксплуатационных возможностей соответствующего устройства. Следующая процедура может предоставить быстрый, но ограниченный ответ на то, обладает ли источник питания основными функциональными характеристиками. Кроме надлежащей квалификации по безопасности работы с высоким напряжением, какое-либо специальное оборудование не требуется.

**Предупреждение о соблюдении техники безопасности**

Высоковольтные источники питания являются опасными и могут повлечь летальные последствия. Используйте всю информацию по технике безопасности, приведенную в руководстве по эксплуатации источников питания и на веб-сайте. При отсутствии опыта и квалификации по безопасности работы с высоким напряжением для проведения таких испытаний не приступайте к этим испытаниям. В случае сомнений свяжитесь с компанией Spellman High Voltage и верните источник питания на завод для диагностики. Ваша безопасность — это ваша ответственность. В случае сомнений относительно способности безопасно провести эти испытания... НЕ ПЫТАЙТЕСЬ ПРОВЕСТИ ЭТИ ИСПЫТАНИЯ. Верните источник питания в компанию Spellman для диагностики.

**Общее представление**

Практически для всех высоковольтных источников питания Spellman предусмотрена возможность программирования напряжения и тока, что позволяет устройству работать либо в качестве источника напряжения, либо в качестве источника тока. Большинство людей использует наши источники питания в качестве источника напряжения... устанавливают настройки тока на максимум и регулируют/контролируют выходное напряжение источника питания. Но также можно использовать устройство и в качестве источника тока... установить напряжение на максимум и регулировать/контролировать выходной ток источника питания. Мы можем проверить функционирование режима стабилизации напряжения и тока довольно просто без каких-либо специальных навыков и оборудования. Это просто первичное испытание, но оно может быть полезным для определения основных функциональных характеристик источника питания, который вызывает сомнения.

**Режим стабилизации напряжения**

Чтобы проверить способность источника питания работать в режиме стабилизации напряжения, мы собираемся запустить его в «разомкнутой цепи» (испытание без нагрузки). Надлежащим образом функционирующий высоковольтный

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-22 (продолжение)

источник питания должен быть способен создавать максимальное номинальное выходное напряжение в условии без нагрузки. В этих инструкциях делается предположение, что источник питания — это полнофункциональное устанавливаемое в стойку устройство. Эти инструкции также будут справедливы для модульных устройств, но потребуются измерение и обработка сигналов обратной связи. Убедитесь в том, что источник питания правильно подключен к входному питанию и заземлен в соответствии с инструкциями, приведенными в руководстве оператора. Проверьте, чтобы источник питания был выключен, подождите 5 минут, чтобы произошло рассеивание имеющегося остаточного заряда, и вытяните выходной кабель высокого напряжения из источника питания.

Подайте входное питание на источник питания. Переключите источник питания в режим ожидания (ВН ВЫКЛ). Установите ток на максимум, а напряжение на минимум. Переключите источник питания в положение (ВН ВКЛ). Медленно увеличивайте напряжение. Измеритель напряжения на передней панели должен отображать соответствующее выходное напряжение. На панели диагностики неисправностей должно отображаться слово VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ), указывая на то, что устройство работает в режиме стабилизации напряжения. Установите выходное напряжение на максимум, источник питания не должен испытывать проблем в создании максимального выходного напряжения при отсутствии нагрузки.

Переключите источник питания в режим ожидания (ВН ВЫКЛ). Отключите входное питание от источника питания и подождите 5 минут, чтобы произошло рассеивание имеющегося остаточного заряда.

**Режим стабилизации тока**

Чтобы проверить способность источника питания работать в режиме стабилизации тока, мы собираемся запустить его в режиме «короткого замыкания». Надлежащим образом функционирующий высоковольтный источник питания способен создавать максимальный номинальный выходной ток в условии нагрузки короткого замыкания.

Нам потребуется для использования высоковольтный выходной кабель, который был отсоединен в предыдущем испытании. Это важно для безопасности, «нагрузочный конец» (без концевой разъем) высоковольтного кабеля необходимо подсоединить к контакту заземления на задней панели источника питания. Только после этого можно вставить конец высоковольтного кабеля с разъемом в заднюю панель высоковольтного источника питания. Теперь выход источника питания безопасно подсоединен к земле.

Подайте входное питание на источник питания. Переключите источник питания в режим ожидания (ВН ВЫКЛ). Установите напряжение на максимум, а ток на минимум. Переключите источник питания в положение (ВН ВКЛ). Медленно увеличивайте ток. Измеритель тока на передней панели должен отображать соответствующий выходной ток. На панели диагностики неисправностей должно отображаться слово CURRENT (ТОК), указывая на то, что устройство работает в режиме стабилизации тока. Настройте выходной ток на максимум, источник питания не должен испытывать проблем в создании максимального выходного тока в условии нагрузки короткого замыкания.

Переключите источник питания в положение (ВН ВЫКЛ). Отключите входное питание от источника питания и подождите 5 минут, чтобы произошло рассеивание имеющегося остаточного заряда. Выньте из источника питания конец высоковольтного кабеля с разъемом. Далее отсоедините нагрузочный конец (без концевой разъем) высоковольтного кабеля от контакта заземления на задней панели.

**Вывод**

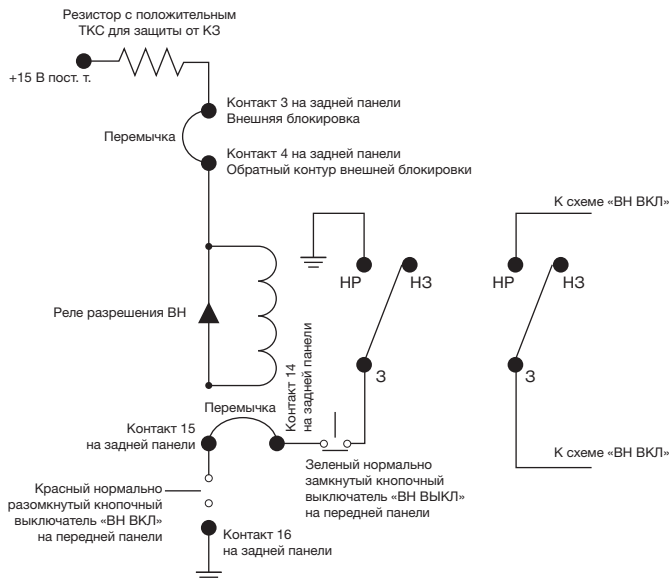
Эти два испытания показали, что работает контур напряжения (схемы обработки и обратной связи) и работает контур тока (схемы обработки и обратной связи). В виду того, что мы подключали устройство к разомкнутой и короткозамкнутой цепям, мы в действительности не проверяли способность источника питания производить мощность. Однако, эти два простые испытания могут подтвердить, что источник питания обладает некоторыми основными функциональными характеристиками, и проверяют способность надлежащей обработки сигналов обратной связи по напряжению и току.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

УП-23

### Пояснение схемы SL ВН ВЫКЛ и ВН ВКЛ

Приведенная ниже схема показывает упрощенную схему «SL ВН ВЫКЛ и ВН ВКЛ», функционально она правильная, но она не показывает всю фактическую схему. В действительности имеются дополнительные блокировки и схемы, которые могут выключать высокое напряжение в случае обнаружении отказа. Показанные выключатели — это выключатели «ВН ВЫКЛ» и «ВН ВКЛ» на передней панели. Три точки на упрощенной схеме подведены к задней панели и обозначены как «контакт 14», «контакт 15» и «контакт 16»:



#### Схема SL ВН ВЫКЛ и ВН ВКЛ

- Контакт 14:** Одна сторона нормально замкнутого кнопочного выключателя «ВН ВЫКЛ» на передней панели
- Контакт 15:** Общая точка между кнопочными выключателями «ВН ВЫКЛ» и «ВН ВКЛ» на передней панели
- Контакт 16:** Одна сторона нормально замкнутого кнопочного выключателя «ВН ВЫКЛ» на передней панели

#### ВН ВЫКЛ

Контакты 14 и 15 — нормально замкнутые. Они должны быть соединены между собой для использования зеленого выключателя «ВН ВЫКЛ» на передней панели. Мы поставляем устройство с установленной переключкой. При желании использования дистанционного выключателя «ВН ВЫКЛ» необходимо убрать переключку и соединить нормально замкнутый выключатель между этими двумя точками. Если разомкнуть дистанционный выключатель (или нажать выключатель «ВН ВЫКЛ» на передней панели), устройство отключит высокое напряжение. Любой дистанционный выключатель «ВН ВЫКЛ» подсоединяется последовательно к выключателю «ВН ВЫКЛ» на передней панели.

#### ВН ВКЛ

Контакты 15 и 16 — нормально разомкнутые. Если на мгновение нажать красный выключатель «ВН ВКЛ» на передней панели, произойдет включение и фиксация высокого напряжения (предполагается, что блокировка замкнута, а отказы отсутствуют). При желании использования дистанционного выключателя «ВН ВКЛ» необходимо соединить нормально разомкнутый выключатель параллельно контактам 15 и 16. Мгновенное замыкание контактов включит высокое напряжение. Любой дистанционный выключатель «ВН ВКЛ» подсоединяется параллельно выключателю «ВН ВКЛ» на передней панели.

Компания Spellman использовала эту схему ВКЛ./ВЫКЛ. высокого напряжения на множестве своих стоечных высоковольтных источников питания на протяжении десятилетий с получением исключительных результатов.

УП-24

### Экологические аспекты высоковольтных источников питания Spellman, рентгеновских генераторов и источников рентгеновского излучения Monoblock®

В технических паспортах продукции Spellman есть спецификация, озаглавленная «Технические требования внешних условий работы». Здесь указаны рабочая температура изделия, температура хранения и влажность. Соблюдение этих технических условий должно предотвратить возникновение проблем с окружающей средой. Тем не менее, мы хотели бы раскрыть пару смежных тем, связанных с окружающей средой, которые могут быть полезны пользователям нашего оборудования.

#### Охлаждение с помощью адекватного забора и отвода воздуха

Многие высоковольтные источники питания Spellman, рентгеновские генераторы и источники рентгеновского излучения Monoblock® используют принудительное воздушное охлаждение с помощью автономных вентиляторов. Эти внутренние вентиляторы обеспечивают воздухообмен, необходимый для поддержания охлаждения устройства во время работы. Важно, чтобы отверстия для забора воздуха в металлическом корпусе агрегатов и отверстия для выпуска

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-24 (продолжение)

воздуха и/или защитный кожух вытяжной вентиляции блока вентиляторов не были заблокированы или загромождены. Для правильной работы устройства необходим свободный и беспрепятственный приток воздуха внутрь и наружу.

**Стойки: забор холодного воздуха через боковые панели, горячий выхлоп через заднюю панель**

Многие высоковольтные источники питания и рентгеновские генераторы Spellman «стоечного» типа имеют стандартную схему воздушного потока для облегчения монтажа в корпусах шкафов. Большинство устройств всасывают холодный воздух через отверстия воздухозаборника на передней половине боковых панелей стойки в сборе. Большинство агрегатов выводят горячий воздух наружу (с помощью внутреннего вентилятора) через перфорацию в металлическом листе задней панели или через установленный на задней панели вытяжной вентилятор.

**Предотвращение рециркуляции воздуха при монтаже стоечных блоков в шкафах**

При установке одного или нескольких высоковольтных источников питания и/или рентгеновских генераторов Spellman «стоечного» типа в шкаф важно предотвратить рециркуляцию воздуха внутри корпуса шкафа. Рециркуляция определяется как попадание горячего отработанного воздуха с задней панели устройства обратно в отверстия для забора холодного воздуха на боковых панелях устройства. Для предотвращения рециркуляции воздуха может потребоваться перегородка для физического разделения всасывания холодного воздуха и выпуска горячего воздуха. В некоторых ситуациях для обеспечения необходимого потока воздуха может потребоваться вытяжной вентилятор, установленный в шкафу. Иногда для обеспечения необходимого воздушного потока может потребоваться как дефлектор, так и вытяжной вентилятор, если в корпусе шкафа установлено несколько устройств.

**Эксплуатация источников питания в запыленных и/или загрязненных, нерегулируемых средах**

Практически вся продукция, которую производит и продает компания Spellman, предназначена для использования в условиях, которые мы неофициально называем «регулируемой офисной средой». Мы предполагаем, что технические характеристики рабочей температуры и влажности будут соблюдаться в соответствии с техническим паспортом. Кроме того, мы ожидаем, что устройства будут эксплуатироваться в регулируемой офисной среде, свободной от чрезмерной пыли / загрязнения сухими частицами или химическими парами, образующимися в различных промышленных процессах. На протяжении многих лет компания Spellman работала с клиентами, столкнувшимися с такого рода неблагоприятными местными экологическими ситуациями, и рекомендовала два решения. Первый — это перемещение установки в более «регулируемую среду», то есть удаление установки из неблагоприятной среды. Это может потребовать использования более длинного высоковольтного кабеля, что потенциально может быть проблематичным:

Второе решение заключается в локальной изоляции устройства от проблемной окружающей среды с помощью герметичного шкафа с кондиционером. Хотя это может показаться несколько драматичным и дорогостоящим, мы видели, как это решение «спасало положение» в нескольких неприятных производственных ситуациях.

**Выводы**

Благоприятные условия окружающей среды для высоковольтных источников питания, рентгеновских генераторов и рентгеновских источников Monoblock<sup>®</sup> обеспечат длительную бесперебойную работу.

## УП-25

**Высоковольтный источник питания искрит. Как выяснить, в чем проблема?****Проблема**

Если у вас есть высоковольтный источник питания Spellman с отсоединяемым высоковольтным кабелем и если во время работы наблюдается искрение, можно выяснить, где находится проблема. Эта процедура применима только к высоковольтным источникам питания Spellman с однопроводным съемным высоковольтным кабелем с глубоким цилиндрическим разъемом. Данная процедура испытания не подходит для рентгеновских генераторов, использующих имеющиеся в продаже многопроводные рентгеновские разъемы (такие как соответствующий федеральному стандарту 75 кВ рентгеновский разъем или разъемы серии R), поскольку эти разъемы не рассчитаны на работу с максимальным номинальным напряжением без установленного ответного кабеля.

**Предупреждение о безопасности**

Высоковольтные источники питания опасны и могут привести к летальному исходу. Используйте всю информацию по технике безопасности, приведенную в руководстве по электропитанию и на веб-сайте. Если у вас нет навыков и квалификации в области безопасности при высоком напряжении для проведения этих испытаний, не пытайтесь проводить эти испытания. В случае сомнений обратитесь в компанию Spellman High Voltage и верните источник питания на завод для оценки. Ваша безопасность — это ваша ответственность, если вы сомневаетесь в своей способности безопасно выполнить эти испытания... НЕ ПЫТАЙТЕСЬ ВЫПОЛНИТЬ ЭТИ ИСПЫТАНИЯ. Верните источник питания компании Spellman для оценки.

**Концепция**

Высоковольтный кабель соединяет выход высоковольтного источника питания с нагрузкой потребителя. Если во время работы источника питания наблюдается образование дуги, то это может произойти в трех местах: сам источник питания, высоковольтный кабель или «нагрузка потребителя». Просто изолировав эти элементы, мы, возможно, сможем определить, в чем заключается проблема.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

## УП-25 (продолжение)

**Проверка высоковольтного источника питания**

Высоковольтные источники питания Spellman, оснащенные однопроводным съемным кабелем с фирменным цилиндрическим разъемом, рассчитаны на работу при максимальном выходном напряжении без подключения кабеля. Отключив устройство от сети переменного тока и подождяв 10 минут, отсоедините высоковольтный кабель от источника питания. Это позволит настроить устройство так, чтобы оно находилось в истинном состоянии «без нагрузки». Правильно работающий источник питания должен иметь возможность включения и установки максимального выходного напряжения. Если это может быть достигнуто без каких-либо проблем с образованием дуги, то проблема не в высоковольтном источнике питания. Если внутри блока питания раздаются хлопающие, щелкающие, щелкающие звуки или мигает индикатор ARC, то проблема в источнике питания, и его необходимо вернуть для ремонта. Верните высоковольтный кабель вместе с источником питания.

**Проверка высоковольтного кабеля**

Если источник питания прошел вышеуказанное испытание, следующим шагом будет проверка высоковольтного кабеля. Отключив устройство от сети переменного тока и подождяв 10 минут, осторожно подсоедините высоковольтный кабель к высоковольтному источнику питания. «Нагрузочный» конец высоковольтного кабеля должен быть помещен в заземленную клетку Фарадея соответствующего размера для защиты пользователя. Кроме того, сторона нагрузки высоковольтного кабеля, возможно, должна заканчиваться на поверхности защиты от коронного разряда, чтобы подавить образование коронного разряда. Эту функцию могут обеспечить высоковольтные делители серии HVD компании Spellman (HVD100, HVD200 или HVD400). Убедитесь, что для напряжений используются соответствующие расстояния пробоя воздуха для максимальных напряжений, ожидаемых во время испытания.

Если все подключено правильно и устройство безопасно, включите высоковольтный источник питания и установите его на максимальное выходное напряжение. Если вы можете достичь максимального номинального выходного напряжения без образования дуги, то высоковольтный кабель исправен. Если наблюдается образование дуги, то высоковольтный кабель необходимо заменить. Выключите высоковольтный источник питания, отключите устройство от сети переменного тока и подождите 10 минут, пока не рассеется остаточный заряд. Используйте разрядник короткого замыкания на землю и прикоснитесь к центральному проводнику высоковольтного кабеля, чтобы убедиться, что остаточный заряд рассеян, прежде чем продолжить.

**Проверка потребительской нагрузки**

Используйте разрядник короткого замыкания на землю и прикоснитесь к центральному проводнику высоковольтного кабеля, чтобы убедиться, что остаточный заряд рассеян, прежде чем продолжить. Подсоедините центральный проводник высоковольтного кабеля к вашей нагрузке так, как вы считаете нужным для вашего применения.

Убедитесь, что все компоненты, связанные с высоковольтным выходом или связанные с ним, расположены внутри заземленной клетки Фарадея для обеспечения безопасности пользователя. Убедитесь, что для ожидаемых настроек высокого напряжения используются соответствующие расстояния пробоя воздуха. Убедитесь, что все высоковольтные блокируемые панели подключены и закрыты, и что включение высоковольтного источника питания с подключенной к нему нагрузкой безопасно.

Включите высоковольтный источник питания и медленно увеличивайте напряжение. Если вы наблюдаете хлопки, щелчки, щелчки, внешние по отношению к высоковольтному источнику питания, или если мигает индикатор ARC, значит, проблема связана с подключенной потребительской нагрузкой, и ее необходимо проанализировать, чтобы определить причину возникновения дуги и какие меры требуются.

## УП-26

**Зарядка конденсаторов и высоковольтные источники питания Spellman****Проблема**

Высоковольтные источники питания Spellman используются в широком спектре областей применения, включая зарядку конденсаторов. Не все задачи зарядки конденсаторов могут быть решены с помощью наших устройств, поэтому мы обычно просим клиента заполнить анкету для зарядки конденсаторов. Мы рассмотрим область применения и выясним, подойдет ли стандартное устройство, подойдет ли модифицированное стандартное устройство, или у нас нет аппаратного решения, и мы должны отказаться от этой возможности. Каковы основные проблемы с высоковольтными источниками питания Spellman и зарядкой конденсаторов? Давайте рассмотрим этот вопрос немного подробнее.

**Как оборудование Spellman создает высокое напряжение?**

Практически во всех продуктах, которые разрабатывает, производит и продает Spellman, используется схема, называемая схемой умножения Кокрофта-Уолтона. Эта схема представляет собой каскадную сеть диодов и конденсаторов, используемых для генерации высоких напряжений. Эта схема существует уже давно, первоначально она использовалась для ранних экспериментов с ускорителем в 1930-х годах. При последовательном размещении нескольких каскадов этой схемы можно генерировать чрезвычайно высокие напряжения, но этот метод генерации высокого напряжения имеет свои преимущества и недостатки.

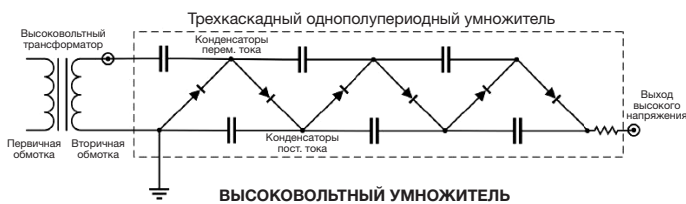
**Схема умножения Кокрофта-Уолтона**

В отличие от ранних применений этой схемы, современные высокочастотные инверторные технологии работают в диапазоне десятков или сотен килогерц, уменьшая значение общей емкости, необходимой для работы. Тем не менее, емкость может быть значительной, и после зарядки

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

### УП-26 (продолжение)

до требуемого выходного напряжения накопленная энергия в емкости умножителя может быть также большой. В устройствах Spellman добавлен последовательный ограничительный резистор между выходом умножителя Кокрофта-Уолтона и выходным разъемом высоковольтного источника питания, чтобы ограничить ток короткого замыкания разряда до разумного уровня.



### Последовательный ограничительный резистор

Этот последовательный ограничительный резистор должен рассеивать потери  $I^2R$  номинального выходного тока источника питания наряду с рассеиванием энергии, накопленной в умножителе во время короткого замыкания. Во время короткого замыкания напряжение на выходном разъеме падает до нуля, но емкость умножителя все еще заряжена. Полное выходное напряжение подается на ограничительный резистор. Любая энергия, запасенная в емкости умножителя, рассеивается в виде тепла в ограничительном резисторе. Этот ограничительный резистор имеет ограниченные физические размеры и возможности обработки мощности. Часто ограничительный резистор объединен с остальной частью узла умножителя, что еще больше снижает его способность рассеивать тепловую энергию.

### Перегрев блока ограничительных резисторов последовательного выхода

Отдельные или прерывистые вспышки дуги не повредят источник питания, последовательный ограничительный резистор имеет достаточные возможности для рассеивания такой мощности. «Проблема» возникает, когда происходит повторяющееся, непрерывное образование дуги. При таком сценарии мощность, рассеиваемая в последовательном ограничительном резисторе, может превысить его возможности по обработке мощности. Последовательный ограничительный резистор может перегреться и выйти из строя, что приведет к необратимому повреждению источника питания. Такой вид повреждения считается неправильным использованием источника питания, и ремонт не покрывается гарантией.

### Схема защиты от дуги

Многие высоковольтные источники питания Spellman оснащены схемой защиты от дуги, которая отслеживает возникновение дуги и может вмешаться в работу источника питания, чтобы предотвратить повреждение источника питания непрерывной дугой. Некоторые менее дорогие модульные источники питания Spellman не имеют схемы защиты от дуги, поэтому необходимо позаботиться о защите источника питания от непрерывной дуги.

### Устройства для зарядки конденсаторов

Источники питания Spellman предназначены для зарядки конденсаторов на низкой частоте или для «одноразовых» применений, где накопление тепла в последовательном ограничительной резисторе не является проблемой. Если для вашей задачи требуется непрерывный разряд короткого замыкания с частотой несколько герц, десятков или сотен герц, то лучше использовать настоящий «источник питания с зарядкой конденсатора». Эти специализированные зарядные устройства разработаны для минимизации выходной емкости и имеют очень мощную схему ограничения выходного сигнала, что исключает проблемы, связанные с непрерывной разрядкой выхода при коротком замыкании.

В ассортименте Spellman представлено всего несколько настоящих источников питания для зарядки конденсаторов: CCM, CCM500 и CCM1KW. Это настоящие источники питания для зарядки конденсаторов, но их возможности по выходному напряжению несколько ограничены.

### Анкета по зарядке конденсаторов

Если ваша задача заключается в зарядке конденсаторов, пожалуйста, обратитесь к специалисту по продажам и заполните нашу анкету по зарядке конденсаторов, чтобы мы могли оценить ваши требования и установить, можем ли мы предложить аппаратное решение, удовлетворяющее вашим требованиям.

### УП-27

### Что означает неисправность «ошибка стабилизации»?

#### Ситуация

Многие источники питания Spellman, устанавливаемые в стойку, имеют на передней панели дисплей диагностики неисправностей с защитой токоведущих частей. На этом дисплее отображается информация о нормальной работе источника питания, например, режим стабилизации напряжения, режим стабилизации тока, разомкнутая внешняя блокировка, замкнутая внешняя блокировка и различные другие нормальные рабочие параметры источника питания. Этот дисплей также показывает, когда возникают неисправности или проблемы с источником питания, одной из которых является ошибка стабилизации.

#### Ошибка стабилизации

Если один из двух контуров управления (в режиме стабилизации напряжения или в режиме стабилизации тока, в зависимости от параметров программирования напряжения/тока и импеданса нагрузки) активно управляет источником питания, устройство ведет себя нормально. Если ни контур напряжения, ни контур тока не находятся в активном управлении, то оба контура насыщаются в попытке создать требуемое напряжение/ток/мощность, что приводит к отключению источника питания с выдачей неисправности «Ошибка стабилизации».

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. ВИП

### Способы проверки компанией Spellman цепи ошибки стабилизации

Spellman подает полную номинальную резистивную нагрузку по напряжению/току на выход проверяемого устройства, требуя полного выходного напряжения/тока и мощности. Затем мы понижаем входное напряжение переменного тока с помощью вариатора, чтобы входное напряжение переменного тока упало ниже низких параметров линии (обычно -10 % или более от номинального входного напряжения переменного тока). Здесь мы «разряжаем» источник питания до недостаточного входного напряжения питания переменного тока с целью получения полной номинальной выходной мощности. Как контур напряжения, так и контур тока насыщаются, пытаемся сохранить выходную мощность, создавая временную неисправность «Ошибка стабилизации».

Неисправность можно устранить, нажав зеленую кнопку выключения высокого напряжения на передней панели (или переключив входное напряжение переменного тока) и восстановив входное напряжение переменного тока до номинального уровня.

### Ошибка стабилизации в полевых условиях

Первое, что нужно проверить, если вы столкнулись с ошибкой стабилизации в полевых условиях, — это убедиться, что входное напряжение переменного тока находится в номинальном диапазоне. Если неисправность «Ошибка стабилизации» все еще возникает, велика вероятность того, что внутри источника питания присутствует поломка, не позволяющая выдавать полное

напряжение/ток/мощность. Как правило, в этом случае необходимо связаться с группой обслуживания клиентов Spellman и договориться о возврате источника питания на завод для ремонта.

УП-28

### Импульсные устройства и высоковольтные источники питания Spellman

Компания Spellman разрабатывает, производит и продает высоковольтные источники питания постоянного тока. Как правило, наши источники питания используются при непрерывной нагрузке. Существуют некоторые уникальные применения, в которых пользователи пытаются потреблять большие всплески тока в течение коротких периодов времени. Эти применения могут быть проблематичными, поскольку

наши источники питания не предназначены для такого типа использования. В зависимости от ситуации могут существовать способы найти приемлемое решение, поэтому давайте посмотрим, как это может выглядеть.

### Низкая выходная емкость и последовательный ограничительный резистор

Наши «высокочастотные» импульсные источники питания имеют значительно меньшую выходную емкость, чем старые, традиционные топологии преобразования питания линейной частоты. Кроме того, для ограничения токов разряда короткого замыкания до разумных уровней мы последовательно подключаем к выходу ограничительный резистор. Эта низкая емкость и последовательный ограничительный резистор защищают от попыток извлечь большие импульсные токи из наших высоковольтных источников питания. Для «удержания» выходного напряжения во время таких импульсных требований не хватает внутренней накопительной емкости. Кроме того, последовательный ограничительный резистор будет вызывать большие падения напряжения.

### Буферный конденсатор, поставляемый заказчиком

Одним из возможных способов решения этой проблемы является установка буферного конденсатора импульсного номинала на выходе высоковольтного источника питания. Если пользователь знает величину и длительность импульсов потребляемого тока, он может подобрать размер внешнего буферного конденсатора в соответствии с допустимым падением напряжения. Если это импульсное потребление тока происходит повторяющимся образом, имейте в виду, что контуры напряжения источника питания могут потребоваться десятки миллисекунд, чтобы отреагировать и скорректировать его. Это дает основание для определения размера буферного конденсатора, ошибочно полагаясь на больший размер большей емкости.

### Изолирующий резистор

Размещение изолирующего резистора между выходом высоковольтного источника питания и буферным конденсатором может помочь предотвратить потребление больших импульсных токов от источника питания. Когда непрерывная последовательность импульсов установится, это будет выглядеть как средняя нагрузка на источник питания. Источник питания перенастроится, чтобы найти новую точку равновесия. Любое изменение в последовательности импульсов будет выглядеть как изменение нагрузки на источник питания, что потребует от него времени для нахождения новой точки равновесия.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

УП-01

### Основные принципы работы рентгеновского генератора — оптимизация рентгеновской трубки

Рентгеновские генераторы и рентгеновские трубки работают совместно, обеспечивая необходимую надежность применения в современных условиях. Рентгеновские генераторы Spellman предлагают заказчикам высокий уровень развития и гибкость, обеспечивающие возможность адаптировать работу трубок различных производителей в генераторе таким образом, чтобы добиться выполнения специфических целей ваших проектов. Для использования всего потенциала рентгеновских генераторов Spellman важно знать несколько фундаментальных правил, обеспечивающих оптимизацию работы и надежность генератора при его настройке. Если у вас есть вопросы, проконсультируйтесь у специалиста: asktheexperts@spellmanhv.com.

### Основные сведения по совмещению настроек рентгеновского генератора и рентгеновской трубки

#### Подтверждение технических характеристик

Прежде чем заказывать наш генератор высокого напряжения, рентгеновскую трубку или высоковольтный кабель, убедитесь, что ток и напряжение нити накала, значения выходного напряжения и тока генератора соответствуют требованиям рентгеновской трубки. Помимо этого, также проверьте, чтобы расположение выводов и длина высоковольтного кабеля соответствовали техническим характеристикам высоковольтной продукции Spellman.

#### Настройка максимального уровня накала

Ограничение тока в нити накала является одной из наиболее важных настроек. Уставка ограничения тока ограничивает максимальный выходной ток источника питания нити накала для защиты нити в рентгеновской трубке. Эта уставка не дает рентгеновскому генератору превысить заданное значение при любых обстоятельствах. Заданное значение должно быть равно или ниже указанного производителем в техническом паспорте. При его установке ниже максимального значения, указанного в техническом паспорте на рентгеновскую трубку, такое ограничение должно быть на 10–15 % выше тока в нити, необходимого для достижения максимального заданного тока эмиссии (mA) при нижней уставке напряжения (kV). Необходимо помнить, что максимальные значения для нити накала отличаются от значений, необходимых для излучения. Уставка на 10–15 % выше необходимого тока эмиссии обеспечивает запас по уровню, а также улучшенные частотные характеристики. Всегда поддерживайте ограничение тока в нити накала. Оно должно быть равным или ниже рекомендованного производителем максимального значения тока.

#### Установка режима ожидания (предварительный нагрев)

Ток холостого хода в нити накала (называемый в некоторых линейках продукции током разогрева нити накала) — это ток в холостом режиме, подаваемый на нить накала рентгеновской трубки в момент, когда трубка находится в режиме ожидания (отключено высокое напряжение, и нет рентгеновского излучения). Уставка тока разогрева, как правило, составляет примерно 1–2 А, однако необходимо проконсультироваться с производителем рентгеновской трубки. Вполне можно устанавливать ток в холостом режиме на ноль, если нет потребности в быстром наращивании эмиссии.

#### Программное время выхода на рабочий режим

При возможности программирования времени выхода на рабочий режим по напряжению, току и накалу для применяемого изделия, уставки должны обеспечивать самое медленное время выхода, приемлемое для способа применения. Более подробно данный вопрос см. в руководствах к изделию или обратитесь за консультацией в Spellman High Voltage.

#### Зависимость нагрева от длины кабеля

##### Нити накала переменного тока

Нити накала переменного тока работают с высокой частотой тока, поэтому существует потенциальная сложность подачи питания по длинному кабелю из-за его электрического сопротивления. Стандартные блоки калибруются для использования кабеля определенной длины (например, 3 м для устройства DXM) в ходе заводских испытаний. Изменение длины высоковольтного кабеля может повлиять на калибровку тока накала. Если у Вас возникли вопросы по длине кабеля в Вашей системе, обратитесь в Spellman High Voltage.

##### Нити накала постоянного тока

Для нитей накала постоянного тока необходимо учитывать потери в медных проводниках постоянного тока. Используемый сортament провода должен соответствовать требованиям по току. Стандартные блоки калибруются для использования кабеля определенной длины и калибра (например, провод длиной 3 м, 18 калибр для устройства DXM).

##### Требования к напряжению нити накала

Spellman использует регулировку тока для управления накалом. Напряжение, необходимое для накала рентгеновской трубки, определяется по закону Ома:  $V=I \times R$ . Если вы не уверены в том, какие требования по току и напряжению необходимы для вашей рентгеновской трубки, проконсультируйтесь с производителем трубки или Spellman High Voltage.



## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### УП-01 (продолжение)

#### Реакция контура тока (мА) и метод проектирования рентгеновских генераторов для эксплуатации большинства рентгеновских трубок

Не все рентгеновские трубки обладают одинаковыми характеристиками накала. Разные характеристики накала требуют разной реакции на управляющее воздействие для обеспечения стабильного тока эмиссии. Наши стандартные установки в плане реакции на управление эмиссией разработаны для работы со многими рентгеновскими трубками. Некоторые рентгеновские трубки не попадают в данную категорию и требуют специальной компенсации эмиссионного контура для обеспечения стабильной эмиссии. По использованию именно ваших рентгеновских трубок проконсультируйтесь со Spellman High Voltage.

#### Объяснение наших параметров выхода на рабочий режим по напряжению, току и накалу и причин их применения.

Стандартная продукция Spellman предназначена для использования с широким диапазоном рентгеновских трубок и для различных способов применения. Поскольку для некоторых способов применения требуется более быстрое время нарастания (менее 2 секунд), а для других предпочтительно более медленное время нарастания, время выхода на рабочий режим стандартной продукции по умолчанию соответствует скоростям, соответствующим большинству требований и способов применения. Например, у устройства DXM по умолчанию нарастание напряжения составляет 5 секунд, нарастание накала — 2,5 секунды, но данные значения могут регулироваться. По техническим требованиям ко времени нарастания для конкретных используемых рентгеновских трубок проконсультируйтесь с производителем трубок.

#### Без сомнения, мы можем настроить и замедлить нарастание по запросам заказчика, но почему бы не установить нарастание в стандартной продукции на максимально медленные значения?

Некоторые способы применения требуют более быстрого времени нарастания (менее 2 секунд), а для других предпочтительно более медленное время нарастания. Нарастание в стандартных изделиях по умолчанию настроено на скорость, которая соответствует большинству требований и способов применения. Проконсультируйтесь со Spellman High Voltage о настройке времени нарастания в соответствии с вашим способом применения. Меньшее время нарастания напряжения может быть лучше для рентгеновских трубок, т.к. позволяет обеспечить регулируемое распределение напряжения по всей длине трубки. Меньшее время нарастания накала и напряжения может минимизировать нагрузку на нить накала рентгеновской трубки. По вопросам рекомендованного времени нарастания для ваших рентгеновских трубок проконсультируйтесь с производителем трубок.

Не забудьте, что срок службы рентгеновской трубки ограничен. Ее характеристики со временем ухудшаются по мере испарения нити накала. Чем выше ток, тем быстрее происходит испарение и короче срок службы трубки. Чем медленнее изменения напряжения и тока на нити накаливания, тем меньше нагрузка и длительнее срок службы.

#### Пример более быстрого времени нарастания

Уставка предельного тока нити накала 3,6 А

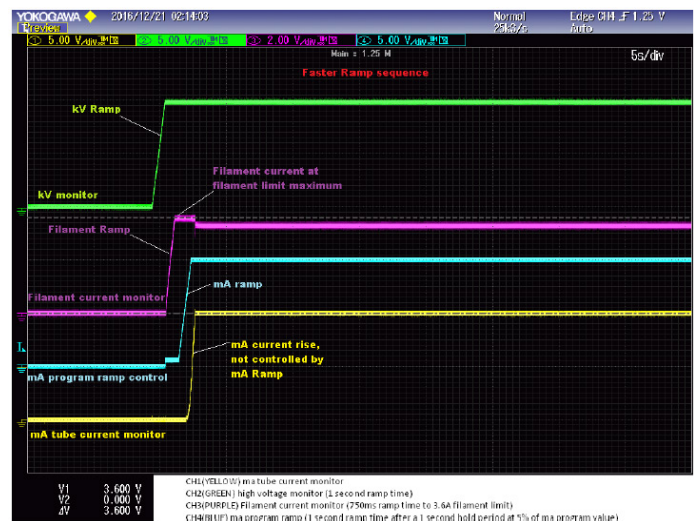
Уставка предварительного прогрева 0,0 А

CH1 (ЖЕЛТЫЙ) Уровень тока трубки, мА

CH2 (ЗЕЛЕНЫЙ) Уровень напряжения, кВ  
(время нарастания 1 с)

CH3 (ПУРПУРНЫЙ) Уровень тока нити накала  
(время нарастания до предела 3,6 А — 750 мс)

CH4 (СИНИЙ) Программное время нарастания, мА  
(время нарастания 1 с после 1 с выдержки при 5 % от программного значения тока (мА))



Как видно из временной диаграммы, более быстрая последовательность нарастания не обеспечивает достаточно времени для достижения нитью накала рентгеновской трубки необходимой температуры для тока эмиссии, прежде чем запустится нарастание тока. Это приводит к нарастанию тока накала до максимального предела нити накала и удержанию на этом уровне в течение нескольких секунд, пока нить накала не достигнет необходимой температуры для требуемого тока эмиссии. Нарастание тока мА не управляется изменением тока и поэтому может быть несколько перерегулированным.

#### Пример более медленного времени нарастания

Уставка предельного тока нити накала 3,6 А

Уставка предварительного прогрева 0,0 А

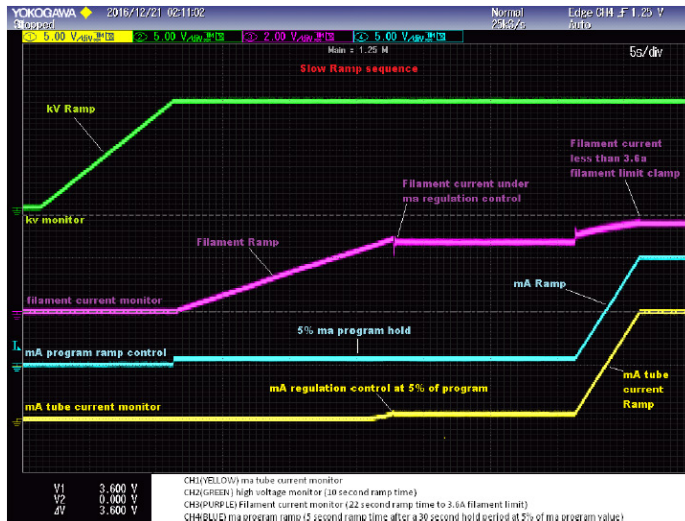
CH1 (ЖЕЛТЫЙ) Уровень тока трубки, мА

CH2 (ЗЕЛЕНЫЙ) Уровень напряжения, кВ  
(время нарастания 10 с)

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### УП-01 (продолжение)

- СН3 (ПУРПУРНЫЙ) Уровень тока нити накала (время нарастания до предела 3,6 А — 22 с)
- СН4 (СИНИЙ) Программное время нарастания, мА (время нарастания 5 с после 30 с выдержки при 5 % от программного значения тока (мА))



Как видно из временной диаграммы, представленной выше, по завершении изменения напряжения программа тока переходит на 5 % от программного значения тока. При этом накал медленно возрастает, обеспечивая регулировку стабилизацией тока. После регулировки и стабилизации тока, ток изменяется на окончательное программное значение без перерегулировки. Обратите внимание, что ток нити накала никогда не достигает уставки максимального предельного значения накала 3,6 А.

### УП-02

#### Распространенные виды неисправностей рентгеновских трубок

##### Введение

Рентгеновские трубки являются проверенным и экономически эффективным способом генерации рентгеновского излучения, применяемого в области медицины, контроля качества и науки. Более 100 лет рентгеновские трубки совершенствовались благодаря появлению новых областей применения, материалов, технологического оборудования и конструкций. Сегодня наиболее распространенными являются два типа: трубка с вращающимся анодом, преимущественно применяемая в медицинских целях, с напряжением от 25 киловольт (кВ) до 150 кВ, и трубка с неподвижным анодом, применяемая в сфере контроля, с напряжением от 25 кВ до более чем 400 кВ, а некоторые — в мегавольтном диапазоне. Трубки с неподвижным анодом обычно работают

на токе 1–20 миллиампер в практически непрерывном режиме и могут оставаться включенными много часов подряд. Трубки с вращающимся анодом работают на токе свыше 1000 миллиампер, но применяются, как правило, в импульсном режиме, примерно от 1 миллисекунды до 10 секунд.

При генерации рентгеновского излучения менее 1 % энергии затрачивается на полезное излучение, тогда как оставшиеся 99 % трансформируются в тепло. Этот фактор ограничивает срок службы рентгеновской трубки. В производстве качественной продукции, осуществляющемся под строгим контролем, задействованы многие научные дисциплины. Среди них: термодинамика, теплопередача, материаловедение, вакуумные технологии, высоковольтные технологии, электроника, ядерные/радиационные отрасли, производственные технологии, а также множество менее объемных, но важных прикладных наук. Сборка и контроль работы рентгеновской трубки и генератора крайне важны для получения ожидаемых технических результатов и обеспечения длительного срока службы трубки.

#### Естественный износ

Рентгеновские трубки стареют. Срок их службы ограничен, так как их характеристики начинают постепенно снижаться, а использованные материалы расходуются. Поэтому эффективность работы трубок снижается и со временем становится неудовлетворительной.

#### Нормальное выгорание нити накала

Пучок электронов образуется в рентгеновской трубке вольфрамовой нитью накала, которая используется в электронных трубках с момента их появления, а также применяется в лампах накаливания. Проводились эксперименты с другими источниками излучения: импрегнированными катодами, гексаборидом лантана и церия, вольфрамом, легированным торием и рением. Чистый вольфрам остается оптимальным материалом для нитей накала. Нить изготавливают из проволоки, которую свивают в спираль и помещают в чашу. Она действует как фокусирующий элемент и образует требуемый пучок электронов прямоугольной формы. Спираль служит для упрочнения нити накала и обеспечивает увеличение поверхности для максимизации излучения электронов.

Вольфрамовая проволока представлена на рынке в пригодных для использования формах. Проволока относительно прочная, жесткая и сохраняет форму при управляемой вибрации и ударной нагрузке. Изготовители рентгеновских трубок стабилизируют и укрепляют нити накала с помощью процесса, который называют рекристаллизацией. Он превращает волокнистую микроструктуру необработанной проволоки в кристаллическую структуру с соотношением длины и диаметра в диапазоне от 3 до 6. Рекристаллизация осуществляется путем очень быстрого нагрева проволоки до температуры примерно 2 600 градусов Цельсия за несколько секунд и выдерживания в течение очень короткого времени.

Общим параметром нитей накала является ресурс накала. Когда горячий вольфрам медленно испаряется с поверхности, скорость его испарения зависит от температуры:

**УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ.  
РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ****УП-02 (продолжение)**

чем выше температура, тем выше скорость испарения. В идеальных условиях вольфрам испаряется равномерно, но на практике он начинает образовывать горячие пятна на границах кристаллического зерна, которые выглядят как зазубрины. Вольфрам испаряется с горячих пятен легче, и проволока в этих местах истончается сильнее. В конце концов она прогорает насквозь. Чем выше температура нити накала, тем больше кристаллов вольфрама со временем образуется, и тем быстрее идет образование зазубрин. Кроме того, если допускать значительные броски пускового тока на холодную нить накала, это ускоряет выгорание из-за перегрева истончившихся участков.

С точки зрения ресурса нити накала, сокращение массы проволоки примерно на 10 % рассматривается как окончание срока службы. Это означает уменьшение диаметра проволоки на 5,13 %, когда нить накала достигает примерно 98 % срока службы. (Tungsten Filament Life Under Constant-Current Heating, A. Wilson, Journal of Applied Physics, vol. 40 No. 4 Pg. 1956, 15 March 1969) (В этом источнике также приведено хорошее изображение зазубренной нити накала под воздействием постоянного тока и незазубренной проволоки под воздействием переменного тока). Уменьшение диаметра на 5 % или 6 % рассматривается многими производителями как исчерпание ресурса.

**Ускоренное выгорание нити накала**

На характеристики рентгеновской трубки влияют несколько факторов, в том числе ток трубки, напряжение трубки, расстояние между анодом и катодом, угол мишени, размер фокусного пятна (размер пучка электронов). Размер фокусного пятна зависит от площади поверхности проволоки, шага спирали (количество витков на 2,54 см), диаметра/длины спирали, а также от того, насколько спираль выступает из чаши для фокусировки и какова форма самой этой чаши. Только напряжение между анодом и катодом и ток (температура) нити накала определяют излучение трубки. Излучение подчиняется уравнению Ричардсона — Дешмана и зависит от температуры: чем выше температура, тем сильнее излучение.

Нить накала в трубке становится горячее, когда от трубки требуется больший ток при фиксированном напряжении или требуется больший ток, но трубка работает на меньшем напряжении. В качестве примера сравнивают два случая трубки с неподвижным анодом. Первый — трубка, работающая при 160 кВ и 1 миллиампере (мА) по сравнению с 5 мА. В этой трубке нить накала рассчитана для работы при 2086 градусах Кельвина по сравнению с 2260 градусами Кельвина при 5 мА. Увеличение на 174 градуса повышает скорость испарения в 21 раз при 5 миллиамперах по сравнению с работой при 1 миллиампере (The Rates of Evaporation and the Vapor Pressure of Tungsten..., Jones and Mackay, Physical Review, Vol. XX No. 2, August 1927.) Второй — у той же трубки, работающей при 40 кВ и 5 мА, если сравнивать со 160 кВ и 1 мА,

температура составляет 2 300 К и 2 086 К соответственно, что сокращает ресурс примерно в 43 раза. Что интересно, относительно небольшое сокращение ресурса имеет место при низком токе трубки, когда сокращается напряжение трубки; например, при 160 кВ по сравнению с 40 кВ, когда ток в обоих случаях 1 мА, ресурс сокращается только в 1,3 раза, а при 160 кВ по сравнению с 40 кВ, когда ток в обоих случаях 5 мА, — в 2,1 раза.

Таким образом:

160 кВ при 5 мА по сравнению с 160 кВ при 1 мА — ресурс нити накала сокращается в 21 раз;

40 кВ при 5 мА по сравнению с 160 кВ при 1 мА — ресурс нити накала сокращается в 43 раза;

40 кВ при 1 мА по сравнению с 160 кВ при 1 мА — ресурс нити накала сокращается в 1,3 раза;

40 кВ при 5 мА по сравнению с 160 кВ при 5 мА — ресурс нити накала сокращается в 2,1 раза

Это показывает, что увеличение тока (вызванное повышением температуры нити накала) значительно важнее, чем изменения напряжения трубки. Определенные типы трубок, а также отдельные трубки определенного типа могут отличаться от приведенных примеров.

Повреждения нитей накала, вызванные выгоранием, связаны с высокой рабочей температурой; чем выше температура, тем быстрее нить накала прогорает насквозь. Вольфрам испаряется с поверхности нити, однако это происходит неравномерно, поэтому образуются горячие пятна, испарение с которых происходит быстрее. Горячие пятна образуются на поверхности кристаллов вольфрама, где испарение идет быстрее, чем на других поверхностях. Чем выше температура нити накала и чем дольше время работы, тем больше кристаллов образуется. Длительный срок службы достигается при расположении длинных и узких кристаллов вдоль оси проволоки, а также при поддержании как можно более низкой температуры.

**Медленные утечки**

Для работы рентгеновских трубок необходим высокий вакуум. Металлостеклянные уплотнения и металлические паяные соединения, с которых можно начать, подвергаются усталостным нагрузкам и иногда начинают пропускать малые объемы газа, постепенно увеличивая давление газа. Эффективность работы трубки начинает снижаться из-за испарения материалов и высоковольтного дугового разряда, который может быть вызван повышенным давлением газа.

**Отсутствие рабочей нагрузки**

Из-за отсутствия рабочей нагрузки газы в вакууме трубки скапливаются и перемещаются вдоль поверхностей. Когда нить накала находится под высоким напряжением, может образоваться дуговой разряд, особенно при повышенном рабочем напряжении. Большинство производителей рекомендуют процедуру прогрева, зависящую от продолжительности периода без рабочей нагрузки.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### УП-02 (продолжение)

Она должна быть универсальной, но в отдельных случаях процедура может не подойти для какой-то трубки. В некоторых случаях необходимы дополнительные расширенные рабочие операции при повышенной мощности или напряжении, которые называются выдерживанием. Они способствуют работе трубки. Результат может быть неудовлетворительным или отсутствовать полностью, и тогда трубку необходимо заменить.

### Образование трещин на стекле



Большинство трубок изготавливается со стеклянными колбами с двойными стенками, однако стекло также выполняет задачу изоляции электродов трубки (катода, анода и заземления) от тока утечки и дугового разряда. С течением времени и в зависимости от коэффициента использования металл анода и нити накала начинает испаряться на стеклянные поверхности, что в будущем вызывает дуговой разряд и поломку трубки. Дуговой пробой выводит испаренный материал из состояния покоя и может вызвать протравливание на стеклянных изоляторах. Такое состояние часто называют растрескиванием или травлением.

Для нейтрализации последствий испарения используются различные методы, в том числе пескоструйная обработка стекла (что увеличивает полосу изоляции), применение экранированного анода в трубках с неподвижным анодом (кожух или экран снижает напыление материала мишени на стекло), двойные стенки с металлическим центром (что снижает испарение нити накала на стекло в трубках с вращающимся анодом и некоторых видах трубок с неподвижным анодом), а также применение керамики. Эти методики не предотвращают испарение металла, однако значительно уменьшают объем его отложения на стеклянные и керамические изолирующие поверхности, тем самым отдаляя появление дуговых разрядов. Эти методики могут дать иной нежелательный эффект, например, пескоструйная обработка стекла может привести к высвобождению частиц стекла, что вызывает образование дуговых разрядов.

### Дуговой пробой



Дуговой пробой является проблемой, типичной для всех высоковольтных систем. Некоторые из причин упомянуты выше: высокий уровень газа в вакууме, испарение проводящего металла с напылением на поверхности изоляторов, а также образование трещин или травление изоляторов, которое, в свою очередь, создает повышенное давление газов или ухудшает способность изоляторов выдерживать высокое напряжение. Другие причины, такие как мелкие частицы изолятора или металла, которые высвобождаются во время работы или могут генерироваться в трубке, вырабатывают газ или создают проводящие пленки на изоляторах. Эти частицы могут быть причиной появления малых, но направленных пучков электронов, которые вызывают дуговой разряд.

### Образование микротрещин мишени



При подаче питания на трубку пучок электронов ударяется в мишень, и температура под этим пучком быстро повышается. В случае трубок с неподвижным анодом мощность и температура относительно низкие, и равновесная температура достигается за доли минуты. Поверхность вольфрамовой мишени может легко достигать температуры плавления вольфрама (3400 градусов Цельсия), но существует ограничение примерно до 400 градусов Цельсия (750 градусов Фаренгейта), для того чтобы вольфрамовый диск не отделился от медной основы. Повышение температуры на поверхности мишени создает нагрузки, которые могут привести к образованию малых трещин на поверхности мишени. С течением времени после ряда циклов включения/выключения эти трещины

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### УП-02 (продолжение)

разрастаются, и некоторые электроны из пучка попадают в них, из-за чего изменяется рентгеновское излучение. Вольфрам поглощает часть излучения от трещин, и его интенсивность снижается, а энергия рентгеновских лучей становится более жесткой (лучи более высокой энергии). Также эту тенденцию сокращает работа трубки при низкой мощности и меньший угол мишени.

В случае трубок с вращающимся анодом, допустимая мощность которых может в 1000 раз превышать мощность трубок с неподвижным анодом, образование микротрещин мишеней значительно более выражено и, соответственно, имеет больший эффект. Температура фокусного пятна на мишени в трубке с вращающимся анодом может достигать 2800 градусов Цельсия (более 5000 градусов Фаренгейта). Сниженное излучение против числа воздействий часто называется спадом излучения. Образование микротрещин сокращается за счет использования наименьшей необходимой мощности, наибольшего возможного фокусного пятна и более длительного времени воздействия при сниженной мощности, а не за счет уменьшения времени воздействия при повышении мощности. Такие критерии применимы также к трубкам с неподвижным анодом. Микротрещины сокращают теплопередачу, что повышает температуру фокусного пятна, а это усиливает испарение вольфрамовой мишени с напылением на стекло.

### Случайное повреждение

Хотя это и не частая причина выхода из строя, случайное повреждение может быть вызвано несоблюдением рекомендуемых протоколов при монтаже и эксплуатации. Недопонимание, незнание и допущения могут стать причиной случайного повреждения. Плотницкая поговорка гласит: «Семь раз отмерь, один раз отрежь». В случае с рентгеновскими трубками необходимо все проверять и перепроверять.

### Подшипники

Выход из строя подшипников трубки с вращающимся анодом может стать источником проблем. Все механические системы изнашиваются и перестают работать, поэтому сложность заключается в том, чтобы достичь долговечности. Высокая температура и скорость более всего влияют на сокращение срока службы подшипника. По мере эксплуатации смазочный материал (как правило, из мягкого серебра или свинца) стирается с тела и поверхности качения, возникает контакт стали со сталью, который приводит к заеданию и заклиниванию. При аккуратном использовании подшипники обычно превышают по сроку службы прочие механизмы, подверженные выходу из строя. Отдавая предпочтение трубке с вращающимся анодом перед трубкой с неподвижным анодом, необходимо тщательно и подробно изучить требования к излучению и эксплуатации.

### Производственные дефекты

#### Немедленные отказы

Какие бы усилия ни прилагал производитель, не все изготовленные трубки абсолютно одинаковы. Существуют небольшие различия, но в обязанности производителя входит обеспечение того, чтобы такие различия не влияли на работу трубки.

#### Отбраковка по результатам испытаний

После того как трубка изготовлена и обработана, она подвергается комплексу испытаний для того, чтобы завершить окончательную обработку и, что важнее, убедиться, что трубка соответствует стандартам исполнения, установленным для данной модели. Трубка проходит проверку качества. Прежде всего проводится испытание на стабильность при высоком напряжении. Каждая трубка подвергается воздействию высокого напряжения, как правило, превышающего максимальное рабочее напряжение на 15 % или более при работе на максимальной допустимой мощности. Такая обработка удаляет газы и частицы и подготавливает новые поверхности к работе при высоком напряжении. Затем трубка подвергается испытанию на гарантийные показатели для проверки стабильности при высоком напряжении. При этом при работе на максимальном номинальном напряжении в течение определенного периода времени дуговых разрядов не должно быть, либо их число должно быть ограничено.

Испытываются и измеряются катодная эмиссия, вольтамперные характеристики нити накала, размер фокусного пятна, тепловая нагрузка и другие соответствующие характеристики. Для трубок с вращающимся анодом выполняются дополнительные испытания, например, на шум, вибрацию, время выбега и другие, с тем чтобы оценить показатели работы ротора и подшипника. Трубки, не отвечающие техническим условиям, отбраковывают/утилизируют, но при этом анализируют для выявления причин дефектов, чтобы внести коррективы в процесс производства.

#### Период выдержки

Иногда, несмотря на успешное прохождение испытаний, трубки, которые были выдержаны 2–4 недели, работают неудовлетворительно, особенно в условиях высокого напряжения. Изменение показателей работы обычно бывает вызвано малейшими утечками вакуума, которые невозможно определить нормальными средствами, однако они вырабатывают газы, которые препятствуют хорошей работе (при высоком напряжении). Нормальные тепловые циклические нагрузки могут вызвать утечки или появление вакуума, а также появление токсичных газов. Такое снижение эффективности работы случается крайне редко. В некоторых случаях более длительное пребывание без рабочей нагрузки или нормальные сроки оборота складских запасов выявляют дополнительные случаи выхода из строя.

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### УП-02 (продолжение)

#### Ненадлежащие материалы

Современные материалы, такие как бескислородная медь, кобальтовые сплавы с заданным тепловым расширением, вольфрам с добавлением рения, жаропрочные сплавы, графит по вакуумной технологии, высокотемпературные припои, а также керамика и техническое стекло, значительно повысили эксплуатационные качества трубок. В связи с этими усовершенствованиями необходимо более высокий уровень обеспечения качества, для того чтобы гарантировать рабочие характеристики этих и других материалов. Для обеспечения качества поставок часто используются испытания и сертификаты. Несмотря на это, в производственном процессе случайно могут быть задействованы материалы, не соответствующие стандарту. Хорошим примером может служить заготовка бескислородной меди, которая, если получена в результате экструзии, может содержать строчечные включения, которые вызывают утечки вакуума. Необходимо использовать более дорогие кованные пластины и заготовки. Как правило, подобные дефекты выявляются на производстве, и заказчик с ними не сталкивается.

#### Технологические сбои

Новые технологии, такие как металлы вакуумного переплава, турбомолекулярные вакуум-насосы, высокотемпературная вакуумная обработка, высокотемпературное сжигание газообразного водорода, пайка в вакууме и электрополировка, также обеспечивают повышенные эксплуатационные качества рентгеновских трубок. Автоматизация помогла обеспечить более равномерное качество продукции. Однако, в случае если такой технологический процесс / применяемое оборудование выходит из строя или нарушается управление, отлаженный процесс может дать сбой и привести к появлению ограниченно пригодных или бракованных трубок.

#### Скрытые отказы

Скрытые или непредсказуемые отказы, которые происходят со временем, часто непредвиденны, и иногда их не удается соотнести с известной причиной.

#### Оптимизация процессов

Многие процессы, применяемые при изготовлении трубок и их частей, формировались в течение долгих лет практического опыта. Если нет однозначных показаний, производители неохотно вносят изменения в процесс, опасаясь неизвестных последствий. Например, анод с графитовым диском, припаянным к обратной стороне трубки с вращающимся анодом, необходимо дегазировать перед сборкой. Если температура слишком высокая, может произойти повреждение пайки и точки контакта, а если слишком низкая, то может возникнуть риск для надлежащей дегазации. В случае с неподвижным анодом высокая температура анода способствует дегазации. Но насколько высокую температуру можно допустить и в течение какого

времени, прежде чем появится (скрытое) повреждение? В эту категорию входят многие процессы — такие как дегазация, вакуумная откачка и выдерживание. Излишняя умеренность влечет риск неудовлетворительных эксплуатационных показателей, а излишняя интенсивность — риск повреждений. Найти компромисс сложно, но, когда процесс налажен, зачастую лучше в него не вмешиваться.

#### Неявные или не вполне понятные процессы

Некоторые отказы вызваны такими явлениями, которые не вполне изучены или побочные эффекты которых для различных процессов неизвестны. Почему случается, что изоляционное масло

потемнело и содержит посторонние включения, однако трубка работает нормально? В других системах наблюдается дуговой разряд, но тем не менее и трубка, и охлаждающее масло, и внешняя среда выглядят нормально и дают благоприятный результат при испытаниях. Смазка шариковых подшипников вращающегося анода является хорошим примером неполного понимания процесса. Смазочный материал, как правило, серебро или свинец, наносится методом химического или физического испарения. Он неравномерен по своей природе. Для того чтобы смазочный материал распределился более ровно, необходима своего рода приработка трубки. Средняя толщина также имеет важное значение. Слишком тонкий слой ставит под угрозу срок службы подшипника, а слишком толстый является причиной перебоев в работе трубки, а также частых застреваний. Процесс налаживается на основании накопленного опыта, а также методом проб и ошибок, но физические причины этого феномена понятны не до конца.

#### Анализ отказов / неустановленные причины

Анализ отказов может выявить причину. Это важный инструмент, применяемый производителями для выявления скрытых и немедленных отказов. Иногда проблема очевидна, а иногда для выявления первопричины нужно провести множество расчетов и испытаний. Любой, кто занят анализом отказов, знает, что во многих случаях основную причину не удастся выявить, несмотря на все усилия. Свидетельства оказываются либо уничтоженными в результате отказа, либо ликвидированными в процессе разборки. Иногда найденных свидетельств недостаточно для однозначного вывода. В такой ситуации лучше, что можно сделать, — это прибегнуть к экстраполяции.



**УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ.  
РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ****УП-02 (продолжение)**

Типичной проблемой для достаточно долго прослуживших трубок является дуговой пробой. Наиболее распространенными причинами дугового пробоя являются высокое давление остаточных газов или ухудшение свойств изоляторов и паразитное излучение электронов (известно как полевая эмиссия). Первые два вопроса были затронуты ранее. Что касается полевой эмиссии, микроскопические частицы (как металлических проводников, так и неметаллических изоляторов) могут вызывать малые электрические токи, как правило, в диапазоне наноампер. Причиной их появления являются сильные электрические поля. Такие малые токи, испускаемые в форме луча, при определенных условиях могут сообщать изоляторам заряд, который в дальнейшем разряжается, что приводит к появлению дуги. Также заряд может стать причиной выхода из строя изолятора из-за пробоя, то есть образования в изоляторе отверстия малого размера, вызывающего потерю вакуума. С другой стороны, частицы могут отделяться, разгоняться, тем самым накапливая энергию в электрическом поле, и при внезапном ударе вызывать образование дуги. Удар зачастую становится причиной вторичного повреждения — осколков от удара, в свою очередь усиливающих полевое излучение.

Производители обращают особое внимание на чистоту и стараются уменьшить количество микрочастиц, собирая трубки в чистых комнатах с помощью различных технологий для удаления частиц, таких как ультразвуковая очистка или электрополировка. Несмотря на эти усилия, малые частицы проникают в трубки. Для уменьшения количества микрочастиц каждую новую трубку «выдерживают» или подвергают воздействию высокого напряжения (примерно до 25 % максимального рабочего напряжения), с тем чтобы выжечь или удалить микрочастицы на неактивных частях трубки. Выдерживание трубки в холодных условиях не дает существенного результата, поэтому работу трубки нужно построить по определенному температурному протоколу, которых существует достаточно много. Планы такого выдерживания составляются на основе экспериментального опыта и предварительной оценки, но тем не менее не всегда оказываются оптимальными. Крайне сложно создать трубку, в которой не будет дуговых разрядов вообще.

**Несоответствие области применения**

Хорошим примером неверного выбора трубки может служить ранний этап маммографии, когда для маммограмм применяли стандартные диагностические трубки. В результате диагностика была достаточно плохой, и часто случались лучевые ожоги. Спустя несколько лет стало известно, что излучение молибдена при напряжении примерно 30 кВ с очень малыми фокусными пятнами в трубках, конструкция которых специально разработана с учетом анатомических особенностей, невероятно эффективно в ранней диагностике рака молочной железы. Новые трубки сконструировали по этим требованиям, и сегодня они являются эталоном актуальной ранней диагностики.

**Излучение при низком напряжении (кВ) /  
высоком токе (мА)**

Распространенный вид несоответствия имеет место, когда трубка, рассчитанная на применение в условиях высокого напряжения, используется при пониженном напряжении (обычно половина или менее от максимального), а нить накала пропускает повышенный ток, чтобы преодолеть ограниченное излучение. В частности, если трубка с вращающимся анодом работает при 125 кВ и 300 мА, то при снижении до 50 кВ и 300 мА нить должна работать при мощности на 16 % выше, с тем чтобы преодолеть пониженное напряжение трубки. Поскольку нить охлаждается излучением с температурой, пропорциональной четвертой степени ( $T^4$ ), увеличение на 16 % означает повышение температуры нити лишь на 3,8 %. Это значение кажется небольшим, однако при повышенной мощности вольфрам испаряется в три раза быстрее, что в три раза сокращает срок службы нити накала. Если трубка работает при более высоком токе (в данном случае >300 мА) и при 50 кВ, то ток нити должен быть повышен, что еще больше сокращает ее ресурс. Часто такое несоответствие приходится принять, потому что производитель неохотно идет на изготовление специализированных конструкций, которые будут продаваться ограниченной партией.

**Температура/ресурс**

Основное правило для рентгеновских трубок таково, что температура — их враг. Чем выше подаваемая мощность, тем короче срок службы трубки. Однако при ненадлежащей мощности не будет достаточной интенсивности рентгеновского излучения для выполнения задачи. Испарение нити накала, создающее нежелательные металлические отложения, в конечном итоге приведет к дуговому пробою изолятора. Бомбардировка мишени при повышенной температуре не только приведет к испарению мишени — со временем качество излучения начнет изменяться в части распределения энергии и интенсивности, а также уменьшится из-за микротрещин.

При работе трубки присутствует термомеханическое напряжение. Металлостеклянные уплотнения подвергаются напряжению при нагреве, и чем больше нагрев, тем выше температура, ведущая к повышению напряжения. В конечном итоге могут оторваться малые частицы, либо могут образоваться тонкие трещины на стекле, которые будут расширяться при прохождении излучения. Всегда имеет место механическая усталость, связанная с тепловыми циклическими нагрузками. Чем больше цикличность, тем быстрее развивается усталость. Повышенная мощность вызывает повышенную температуру, которая ускоряет развитие усталости. Работа рентгеновской трубки при минимальной полезной мощности продлевает срок ее службы.

**Ненадлежащая работа с источником питания**

В рентгеновском источнике мощность, необходимая для работы трубки, включая нить накала, а в случае трубки с вращающимся анодом — для питания ротора, поступает от источника питания. Кроме того, источник питания снабжен

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### УП-02 (продолжение)

логической схемой и блокировками, которые использует система. Таким образом, источник питания является неотъемлемой частью рентгеновского источника, и они оба работают согласованно.

### Импеданс источника питания

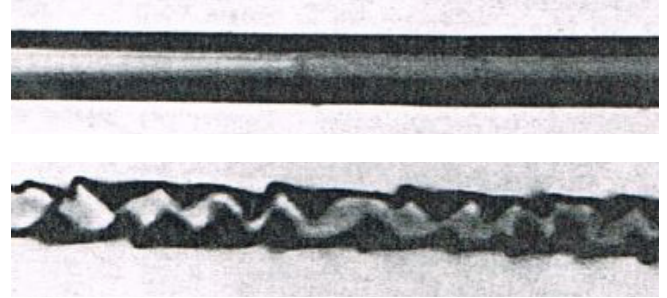
Одной из наиболее важных характеристик питания является импеданс. В случае трубок с неподвижным анодом, которые работают при мощности в несколько сотен ватт, импеданс может быть высоким, то есть содержит значительное сопротивление. Таким образом, в случае дугового разряда повреждения трубки и чувствительного электронного оборудования сводятся к минимуму. Дуга, как правило, гасится при снижении напряжения, поддерживающего ее. Когда ток в дуге встречается с сопротивлением источника напряжения, напряжение на сопротивлении увеличивается, тем самым снижая напряжение на трубке и других частях контура высокого напряжения. Если давление газа в трубке становится достаточно высоким, чтобы поддерживать дуговой разряд, импеданс также защищает источник питания и соответствующее электронное оборудование. Если уровень газа становится слишком высоким, улучшить эффективность работы трубки невозможно.

К сожалению, высокий импеданс также означает, что, если дуговой разряд образуется из-за частиц либо полевой эмиссии или из-за малого испарения, зачастую нет достаточной накопленной энергии для устранения или испарения причины. Из-за этого дуговой пробой может продолжаться. Трубка с вращающимся анодом работает в условиях значительно более высокой мощности, иногда до 100 киловатт, то есть практически в 1 000 раз больше, чем трубка с неподвижным анодом. Здесь высокий импеданс источника питания невозможен, иначе он не будет поддерживать необходимую мощность. В таких случаях часто бывает необходимо ограничить накопленную энергию обычно менее чем 10 джоулями. Высоковольтные кабели и конденсаторы добавочного сопротивления к вольтметру накапливают такую энергию, и это может привести к повреждению трубки из-за образования дуги. Десять джоулей — это не жестко зафиксированное значение, а лишь примерное. Многие трубки удовлетворительно работают при большей накопленной энергии, иные же не будут работать и при меньшей. Емкость становится более сложным вопросом при повышенном напряжении, так как энергия пропорциональна квадрату напряжения.

### Нить накала при постоянном/переменном токе

Как правило, нити накала работают при переменном напряжении/токе. Для этого есть три основные причины. Во-первых, исторически было проще регулировать и подавать переменный ток, а во-вторых, при использовании постоянного тока прослеживается тенденция к образованию кристаллов, из-за чего нить со временем становится хрупкой и быстрее прогорает. В-третьих, хоть это и менее важно, при постоянном токе на одном конце нити

будет небольшой постоянный потенциал, равный рабочему потенциалу нити, что может исказить фокусное пятно, слегка сместив его по отношению к фокусирующей чаше. Этот эффект сильнее выражен в случае небольших фокусных пятен и сильного излучения. При переменном токе такое отклонение попеременно возникает на обоих концах нити и таким образом нивелируется.



При нагревании нити накала с помощью постоянного тока имеет место феномен образования зазубрин, особенно на тонких нитях. В таком случае некоторое количество ионов вольфрама выделяется из испаренных атомов вольфрама, притягивается к отрицательному концу нити и откладывается, образуя серию зазубрин. Такие зазубрины бывают тоньше других участков нити, что приводит к образованию горячих пятен с сопутствующим усилением испарения и в конечном итоге к прогоранию. Имеются данные о сокращении ресурса нити накала от двух до десяти раз при работе на постоянном токе, а не на переменном. Современные источники питания, в которых применяется постоянный ток, получают его с помощью высокочастотного преобразователя. В таких условиях низкоамплитудные высокочастотные колебания порядка 10 кГц наблюдаются в сигнале нити накала, что сводит к минимуму образование зазубрин.

### Высокая частота

Металлостеклянные уплотнения трубки изготавливаются из кобальта или аналогичного сплава, включающего железо, никель и кобальт. Каждый из них является высокомагнитным металлом. Уплотнения включают в себя проходные элементы, через которые идет ток нити накала. При высокой частоте магнитные материалы подвергаются воздействию магнитного гистерезиса, вихревых токов и поверхностного эффекта, что отбирает энергию протекающего тока. Это явление требует, чтобы источник питания вырабатывал большую мощность в сравнении с немагнитными материалами, что необходимо для преодоления потерь. Чем выше частота, тем больше потери. Потеря мощности приведет к нагреву проходных элементов, а эффект механического нагружения в уплотнениях не вполне изучен. В настоящее время используются частоты до 40 кГц. Для катода и анода используются высокочастотные высоковольтные источники питания, но с выпрямлением тока.



**УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ.  
РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ****УП-02 (продолжение)****Скорость вращения / торможение**

Для трубок с вращающимся анодом основными факторами, влияющими на срок службы, являются ресурс подшипника и испарение нити накала. Когда требуется воздействие, на статор подается питание, и анод трубки набирает скорость вращения (в оборотах в минуту). Такая минимальная скорость указана производителем. Исторически существует четыре значения синхронизированной скорости в зависимости от частоты электросети. Для 60 Гц максимальная скорость составляет 3600 об/мин или 10 800 об/мин при тройной скорости, для 50 Гц — это 3000 об/мин и 9000 об/мин при тройной скорости. Эти скорости обычно называют высокой и низкой скоростью для нормальной сингулярной частоты или тройной частоты соответственно. На практике ротор никогда не достигает этой скорости, так как трение в подшипниках и неполная магнитная связь между статором и ротором снижают скорость. Фактически КПД системы статора/ротора составляет лишь около 10 % в сравнении с обычными двигателями, для которых это значение обычно выше 90 %. По этим причинам производители обычно указывают минимальную скорость 3000, 9500, 2800 и 8500 или аналогичные значения, позволяющие выйти из синхронной частоты вращения.

При начале воздействия питание подается на статор в течение определенного времени до достижения минимальной скорости и зависит от момента инерции анода (очень приблизительно пропорционального теплоаккумулирующей способности), напряжения, поданного на статор, а также частоты поданного напряжения (высокой или низкой скорости). Как правило, такое время на раскрутку ротора составляет от 1,5 до 6 или более секунд. После раскрутки статор переходит в рабочий режим, при котором пониженное напряжение (обычно от 80 до 100 вольт) непрерывно подается для поддержания минимальной скорости. Часто установку времени на раскрутку выполняет сборщик таким образом, чтобы оно соответствовало минимальной скорости, и практическое решение этой задачи может быть непростым. Скорость вращения измеряется вибрационными тахометрами и синхронными стробоскопами. Необходимо учитывать тепловое состояние анода. Горячий анод достигнет меньшей скорости, чем холодный, из-за повышенного трения и пониженной магнитной связи. После окончания воздействия скорость ротора снижается или тормозится путем подачи напряжения только на одну обмотку статора.

Торможение выполняется для быстрого снижения скорости вращения подшипника. Кроме того, не менее важно быстро пройти резонанс ротора. Все роторы имеют собственную резонансную частоту, и при ее достижении возможна заметная вибрация ротора/анода. Чтобы быстро пройти резонансную скорость и минимизировать любые негативные воздействия, подается тормозящее напряжение. Стандартные резонансные частоты равны примерно 4000–5000 об/мин (65–80 Гц), важность торможения

намного выше после работы на высоких скоростях. С учетом обычно более короткого времени на разогрев нити накала и более длительного времени на раскрутку ротора очевидна следующая последовательность работы рентгеновской системы: потребность в воздействии, раскрутка статора, разогрев нити накала, воздействие высоковольтного импульса, снятие нагрузки с нити накала, торможение анода. Современные источники питания адаптируются ко всем этим временным последовательностям.

**Разогрев нити накала**

Когда рентгеновская трубка не вырабатывает рентгеновское излучение (то есть на катод и анод не подается высокое напряжение), нить накала находится в так называемом холостом (или предпусковом) режиме. Через нее идет ток, но он ниже точки излучения, в которой трубка потребляет ток. Когда потребуются воздействие, ток в нити накала повышается до предварительно заданного значения, что обеспечивает протекание тока в трубке при подаче на нее высокого напряжения. Когда потребности в рентгеновском излучении нет, высокое напряжение отключается, и нить возвращается к току холостого режима.

Как правило, время разогрева нити варьируется от половины секунды до одной секунды. Эта методика особенно важна для трубки с вращающимся анодом, где токи в трубке высокие, а ресурс нити накала экономит, используя ее только при необходимости в рентгеновском излучении. Ток холостого режима выбирают таким образом, чтобы испарение с нити накала было очень малой долей от тока нити накала, необходимого для мощного излучения. Благодаря такому подходу минимизируется испарение в холостом режиме. Если ток в трубке достаточно низкий, некоторые трубки с неподвижным анодом вообще не разогреваются, и нить накала нужно задействовать из отключенного состояния. В непрерывной импульсной системе возможны проблемы с испарением, так как если частота повтора импульсов высока, между импульсами недостаточно времени на разогрев нити до следующего импульса. Обычно в таких случаях нить работает в режиме разогрева до окончания генерации импульсов. Современные источники питания адаптируются ко всем этим временным последовательностям.

**Логические схемы**

Как видно из приведенного выше описания, логическая последовательность и ее реализация очень важны. Добавим иные системы, такие как блокировки, последовательность получения изображений, требования к рентгенографическим объектам и прочие требования к системе — очевидно, что функционирование и надежность логических схем совершенно необходимы для надежной работы устройств. В некоторых случаях дуговой разряд в трубке становится причиной импульсных помех, вызываемых бросками тока или прерыванием подачи высокого напряжения. Они становятся причиной отката логической схемы. Современные источники питания снабжены изолированными логическими схемами, что

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### УП-02 (продолжение)

защищает чувствительное электронное оборудование от импульсных помех при нормальном режиме работы и в случае дуговых разрядов.

### Уставки ограничения тока / разогрева нити

Ограничение тока в нити накала является одной из наиболее важных настроек. Уставка ограничения тока ограничивает максимальный выходной ток источника питания нити накала для защиты нити в рентгеновской трубке. Эта уставка не дает рентгеновскому генератору превысить заданное значение при любых обстоятельствах. Заданное значение должно быть равно или ниже указанного производителем в техническом паспорте.

При установке ограничения тока в нити накала ниже максимального значения, указанного в техническом паспорте на рентгеновскую трубку, такое ограничение должно быть на 10–15 % выше тока в нити, необходимого для достижения максимального заданного тока эмиссии (мА) при нижней применяемой уставке напряжения (кВ). Необходимо помнить, что максимальные значения для нити накала отличаются от значений, необходимых для излучения. Уставка на 10–15 % выше необходимого тока эмиссии обеспечивает запас по уровню, а также улучшенные частотные характеристики. Всегда поддерживайте ограничение тока в нити накала. Оно должно быть равным или ниже рекомендованного производителем максимального значения тока. Ток холостого хода в нити накала (называемый в некоторых линейках продукции током разогрева нити накала) — это ток в холостом режиме, подаваемый на нить накала рентгеновской трубки в момент, когда трубка находится в режиме ожидания (отключено высокое напряжение, и нет рентгеновского излучения).

Уставка тока разогрева, как правило, составляет примерно от 1 до 2 ампер, однако необходимо проконсультироваться с производителем рентгеновской трубки. В качестве ориентира удобно руководствоваться тем, что максимальный уровень тока разогрева нити накала должен быть не выше 50 % ограничения тока в нити накала по техническому паспорту. Вполне можно устанавливать ток в холостом режиме на ноль, если нет потребности в быстром наращивании тока эмиссии.

### Особенности кожуха трубки

Рентгеновская трубка должна быть помещена в надлежащий контейнер, с тем чтобы предотвратить распространение рентгеновского излучения во всех направлениях, обеспечить надлежащую высоковольтную изоляцию и возможность охлаждения трубки/системы. В случае автономной рентгеновской трубки контейнер называют кожухом, трубкой в сборе или источником излучения, а в случае системы, где источник питания сочетается с трубкой, его обычно называют Monoblock® (зарегистрированная торговая марка Spellman).

### Утечка диэлектрика (изоляционного масла)

Диэлектрик — как правило, трансформаторное масло с противоокислительной присадкой — должен обеспечивать высоковольтную изоляцию для предотвращения дугового разряда от всех высоковольтных поверхностей. Если развивается утечка масла, как правило, это означает также утечку воздуха в кожухе. Если воздух проникнет в область высокого напряжения, это вызовет дуговой разряд. Если образование дуговых разрядов будет продолжаться, углерод, образовавшийся в результате распада масла, будет покрывать поверхности без возможности их восстановления. Масляные уплотнения часто выполняются в виде уплотнительных колец и уплотнений типа Buna-N из резины, пригодной для масла с присадкой. Некоторые материалы, такие как неопрен, для этого непригодны, поскольку при контакте с таким маслом они набухают.



Обычная рекомендация от производителей уплотнительных колец в отношении процента сжатия — примерно 5–10 %, не сдавливать. Обычно используют 25-процентное сжатие, так как при стандартных высоких температурах кожуха уплотнительные кольца «устают», их упругость снижается, и могут появиться утечки.

Применяемое масло содержит абсорбированные газы, которые необходимо отвести с помощью вакуумирования, для того чтобы они не проникли в кожух. Такая обработка повышает электрическую прочность диэлектрика, измеряемую в вольтах на единицу расстояния. Стандартные значения превышают 30 киловольт на 2,54 см. Важно обратить внимание на материалы, применяемые на внутренней части кожуха, это, как правило, пластмассовые изоляторы. Они могут выщелачивать пластификаторы или иные химические реагенты, которые могут раствориться в масле и понизить электрическую прочность. Температура улучшает выщелачивание. Материалы кожуха необходимо тщательно испытывать, даже если части взяты из новых производственных партий.

### Перегрев

Перегрев может вызывать повреждение не только трубки, но и кожуха. Многие системы снабжены теплообменником с вентилятором и иногда насосом для перекачки масла. Такие теплообменники необходимо содержать

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### УП-02 (продолжение)

в чистоте. Пыль является причиной серьезных проблем и затрудняет как естественную, так и принудительную (с помощью вентилятора) воздушную конвекцию. В результате кожух перегревается, из-за чего необходимо проводить техническое обслуживание.

### Температура окружающего воздуха

Необходимо поддерживать температуру окружающего воздуха в соответствии с рекомендациями производителя. Как правило, температура окружающего воздуха равна 25–30 градусам Цельсия. При высоких нагрузках кожух может достигать 75–80 градусов Цельсия, что является стандартным ограничением. Таким образом, температура может повышаться примерно на 50 градусов, и если температура окружающего воздуха выше рекомендованных значений, то их совместное действие приведет к перегреву. Ограждения, часто применяемые при испытаниях и для предотвращения утечек излучения, могут стать причиной повышения температуры окружающего воздуха выше рекомендованной нормы. Кроме того, достаточно часто для защиты оборудования применяют пластмассовое или тканевое покрытие, однако это только препятствует воздушной конвекции и легко может привести к перегреву.

### Пространственное положение кожуха

Кожух трубки, вне зависимости от наличия теплообменника, может нагреваться в верхней части и оставаться без изменений в нижней. Причиной этому является то, что изоляционное и охлаждающее масло формирует сильные конвекционные потоки, которые поднимаются, как дым от сигареты, и переносят тепло в верхнюю часть кожуха. Необходимо обращать внимание на поддержку оптимального положения кожуха при работе. Часто для выявления нагретых участков можно применять термопары, однако для точности измерений необходим хороший термоконттакт.

### Подключение кабелей/заземления

Хотя это и кажется очевидным, важно обеспечить хорошее электрическое соединение. В частности, заземление, а также другие подключения — например, статор, термопредохранители и высоковольтные кабели. Туго затянутые соединения без изношенных контактов и проводов являются обязательным требованием. Соединения высоковольтных кабелей особенно важны: если в них проникнет воздух, он ионизирует область высокого напряжения, и это вызовет дуговой пробой изоляции. Как правило, для изоляции от воздуха и обеспечения плотного контакта поверхностей используют смазку, предназначенную для высоковольтного оборудования. Когда появляются следы дугового разряда, устранить их невозможно. Необходимо строго следовать рекомендациям производителя по установке кабельных изоляторов.

### Расширение диэлектрика

При нагреве масло расширяется в объеме, как и все материалы. Рентгеновские системы должны обладать достаточным объемом, чтобы принять такое расширение. На холодной стороне при отгрузке системы необходимо предусмотреть объем для усадки. Такое расширение и сжатие обычно обеспечивается с помощью гибкой диафрагмы, позволяющей изменять объем в целом. Хорошо проработанная конструкция предусматривает коэффициент запаса. Чем он больше, тем лучше. Хорошим считается коэффициент запаса не менее 25 %. Также важно задать нейтральное положение для теплового перемещения: диафрагма должна быть установлена так, чтобы обеспечивать возможность и расширения, и сжатия, которое может произойти. Эти коэффициенты заложены в требования к конструированию и производству.

### Соблюдение номинальных параметров

Одним из наиболее важных моментов в работе трубки является соблюдение заявленных номинальных значений. Крайне важно ознакомиться с ними и все тщательно спланировать. Высокое напряжение и мощность нити необходимо проанализировать, для того чтобы обеспечить соблюдение требований в части перегрева в долгосрочной перспективе. Краткосрочная чрезмерно высокая мощность на аноде может стать причиной расплавления фокусного пятна. Основными требованиями являются внимание и осторожность. Также важно, чтобы теплообменник был чистым и свободным. То же касается трубок с вращающимся анодом, но, кроме того, для них необходимо обеспечить надлежащую скорость вращения. Важно учитывать индивидуальные мощности излучения, для того чтобы подать питание на надлежащее фокусное пятно, применить корректный график скорости, соблюсти параметры высокого напряжения и выбрать соответствующую длительность импульса. Для предотвращения перегрузки графики должны быть согласованы с излучением нити накала и вольтамперными характеристиками. Легко ошибиться в графиках или неверно их прочесть. Всегда выполняйте двойную проверку.

### УП-03

***Рентгеновские генераторы с плавающей нитью накала и возможные проблемы, которые могут создавать длинные высоковольтные кабели***

### Справочная информация

Компания Spellman производит генераторы рентгеновского излучения уже более 3 десятилетий. Большинство из них относятся к трем основным категориям:

- Управление заземленной нитью накала
- Управление плавающей нитью накала
- Управление нитью накала с биполярным выходом

## УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ. РЕНТГЕНОВСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### УП-03 (продолжение)

#### Тип рентгеновских генераторов с заземленной нитью накала

К рентгеновским генераторам с заземленной нитью накала относятся: XMPG, XLG, FF, DXM, MNX, uX, uXHP, VMX и PMX. Эти генераторы рентгеновского излучения обычно имеют положительное выходное напряжение по отношению к земле. Нить накала имеет постоянный ток и заземлена. Температура (амперы) нити накала, потенциал напряжения (кВ) и время воздействия определяют выходные характеристики рентгеновского изображения. Поскольку нить накала находится на земле и постоянном токе, реализация управления для этого рентгеновского генератора довольно проста и понятна.

#### Тип рентгеновского генератора с плавающей нитью накала

Рентгеновские генераторы с плавающей нитью накала включают XMPF, DF, XRF, DXM, DXM100, XLF, DXB и MFX. Эти рентгеновские генераторы с «плавающей нитью накала» отличаются друг от друга. Их источники питания накала привязаны к выходному напряжению отрицательного катода. Это означает, что источник питания цепи накала должен быть управляемым (с помощью программирования с привязкой к земле и сигналов обратной связи), будучи подключенным к основному высоковольтному выходу, в некоторых случаях на -160 кВ или выше. Реализация генераторов рентгеновского излучения с плавающей нитью накала более сложна.

#### Тип генератора рентгеновского излучения с биполярным выходом

Генераторы рентгеновского излучения с биполярным выходом используют схему с плавающей нитью накала (например, генератор рентгеновского излучения с плавающей нитью накала), но вместо того, чтобы просто оставить анод на уровне земли, он поднимает его на тот же потенциал катода, но противоположной полярности. Это эффективно удваивает напряжение на рентгеновской трубке, обеспечивая большую выходную мощность. Реализация функционирует подобно стандартному генератору рентгеновского излучения с плавающей нитью накала, но со всеми теми же техническими сложностями.

#### Схемы драйверов накала с привязкой к земле

Схемы с нитью накала с привязкой к земле (генераторы рентгеновского излучения с положительной полярностью на выходе) по большей части проще в проектировании и изготовлении. Источником питания нити накала обычно является небольшой источник питания от 0 до 5 А при 10 В постоянного тока. Это относительно простое в реализации и проектировании устройство, поскольку оно привязано к земле и является постоянным током. Поскольку выход нити накала является постоянным током, использование длинных высоковольтных кабелей, как правило, более щадящее. Если в драйвере накала постоянного тока предусмотрено

достаточное напряжение соответствия для управления длинным кабелем, все должно быть хорошо. В целом, схемы накала постоянного тока с привязкой к земле просто проще с точки зрения проектирования и реализации.

#### Схемы драйвера плавающей нити накала

Схемы драйвера плавающей нити накала более сложны с технической точки зрения, так как они должны быть подключены (связаны) с отрицательным высоковольтным выходным потенциалом катода рентгеновской трубки. Требования к напряжению изоляции составляют -50 кВ, -100 кВ, -160 кВ или более. Изолирующие трансформаторы работают на высокочастотном переменном токе, поскольку трансформаторы работают только с переменным током. Цепи накала работают в токовом режиме, поэтому получить фактический ток накала легко с помощью измерительного трансформатора тока. Здесь использование переменного тока для выхода нити накала упрощает требования к изоляции и измерению цепи нити накала. Как правило, рабочая частота для схем с плавающей нитью накала составляет приблизительно 30–40 кГц. Это достаточно высокая частота, чтобы быть неслышимой, а также поддерживать разумный размер магнитов изолирующего трансформатора накала и схемы драйвера накала.

#### Проблемы с длинными высоковольтными кабелями, использующими нить накала переменного тока

Использование высокочастотного переменного тока для применения рентгеновской трубки с плавающей нитью накала упрощает некоторые задачи проектирования, но при использовании этого метода есть один потенциальный недостаток. Высоковольтный кабель становится частью «настроенного резонансного контура» драйвера накала переменного тока, и чрезмерная длина кабеля высокого напряжения может привести к некоторым фундаментальным эксплуатационным проблемам. Стандартное отрицательное выходное напряжение DXM, реализуемое с использованием нити накала переменного тока, калибруется с помощью высоковольтного кабеля длиной 10 футов. Слишком длинные высоковольтные кабели могут иметь такую большую индуктивность, что схема драйвера накала может не соответствовать напряжению, достаточному для приведения в действие длинных высоковольтных кабелей, что вызывает проблемы при эксплуатации рентгеновской трубки. По сути, все высокочастотное напряжение переменного тока падает по длинному высоковольтному кабелю, что не позволяет должным образом управлять нитью накала рентгеновской трубки. Цепи нити накала переменного тока не предназначены для подключения длинных высоковольтных кабелей.

#### Заключение/рекомендация

При работе с генераторами рентгеновского излучения, будь то нить накала постоянного или переменного тока, используйте разумный инженерный подход, стараясь, чтобы высоковольтный кабель (или кабель накаливания) был как можно короче.

**Стандарт IEEE 510-1983.****Рекомендации IEEE по безопасному выполнению работ при испытании высоковольтных устройств и устройств большой мощности**

Институт инженеров по электротехнике и электронике

**СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ**

В настоящем разделе приводятся выдержки из стандарта IEEE 510-1983 с указаниями по мерам предосторожности, которые необходимо предпринимать персоналу, работающему с высоковольтной аппаратурой и выполняющему измерения высокого напряжения, а также представлены рекомендации по технике безопасности для снижения рисков, связанных с использованием электроэнергии.

Рекомендации по правилам техники безопасности при испытании электрооборудования имеют отношение не только к персоналу, но и к испытываемому оборудованию, аппаратуре или системе. Эти практические рекомендации, как правило, связаны с безопасностью при проведении лабораторных испытаний в области высокого напряжения, а также при испытании систем со встроенными высоковольтными источниками питания (ВИП) и т.д. В рамках данных практических рекомендаций в качестве фактического минимума для указанных типов испытаний было принято напряжение, равное приблизительно 1000 В. В тех случаях, когда речь идет о более низком напряжении или особых рисках, решение о применимости этих практических рекомендаций необходимо принимать с учетом индивидуальных особенностей ситуации.

- Следует считать, что все незаземленные выводы испытательного оборудования или испытываемой аппаратуры находятся под напряжением.
- Испытательный стенд и испытываемый образец должны быть надежно подключены к общей линии заземления. Как минимум, допустимый ток заземляющих проводов должен превышать токовую нагрузку, необходимую для отвода максимально возможного тока заземления. При этом необходимо учитывать эффект возрастания потенциала земли вследствие наличия активного и реактивного сопротивления подключения на землю.
- Необходимо принять меры предосторожности для предотвращения случайного контакта персонала с выводами под напряжением либо путем экранирования этих выводов, либо используя защитные барьеры вокруг этой зоны. В схему должны входить контрольно-измерительные приборы для индикации испытательных напряжений.
- В целях безопасности необходимо предусмотреть наличие соответствующей схемы коммутации или, где необходимо, присутствие наблюдателя для немедленного обесточивания испытательных схем. При проведении испытаний с применением постоянного тока необходимо принять меры для разряда и заземления выводов под напряжением, а также предусмотреть дополнительную изоляцию.
- Испытания высоковольтного оборудования и оборудования большой мощности должны проводиться и контролироваться квалифицированным персоналом.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Использование и применение источника питания****ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ЗОНЕ ИСПЫТАНИЙ**

- На входных дверях или около них должны быть установлены предупреждающие знаки, например «ОПАСНО — ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ».
- Насколько это целесообразно, необходимо предусмотреть устройства автоматического заземления для визуально заметного подключения «земли» к высоковольтным цепям, после того как они будут обесточены. В некоторых высоковольтных цепях, особенно в тех, элементы которых переключаются с одной установки на другую, это может быть невыполнимым. В подобных случаях оператор должен подключать «землю» к высоковольтному выводу с помощью надежно изолированной рукоятки. При использовании нескольких соединенных последовательно конденсаторов подключения к системе заземления одного высоковольтного вывода обычно недостаточно. Промежуточные выводы под напряжением также должны заземляться. Это в первую очередь относится к импульсным генераторам, конденсаторы которых должны замыкаться накоротко и заземляться до и во время работы с генератором.
- Защитное заземление контрольно-измерительных приборов (КИП) должно иметь приоритет перед заземлением сигнальных контуров, должно иметь приоритет перед заземлением сигнальных контуров, если не были предприняты иные меры по защите персонала.

**ЦЕПИ УПРАВЛЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ**

- Провода от зоны испытаний должны прокладываться только в заземленной металлической оплетке, которая соединяется с заземленным металлическим корпусом — в противном случае должны приниматься иные меры по защите персонала. В эту категорию попадает проводка цепи управления, подключения к измерительным приборам и кабели, подключаемые к осциллографам. При обычных условиях измерительные приборы и другие средства КИП с доступными выводами должны размещаться в металлической камере со смотровым окном.

**Временные цепи**

- Временные измерительные цепи должны полностью располагаться в зоне испытаний и хорошо просматриваться через ограждение. В качестве альтернативы измерительные приборы могут располагаться за пределами ограждения при условии, что и сами приборы, и проводка за пределами зоны будут заключены в заземленные металлические кожухи.
- С временными цепями управления следует обращаться так же, как с измерительными цепями — они должны размещаться в заземленном корпусе, а все элементы управления в зоне доступа оператора должны иметь потенциал земли.

**ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ**

- Для лабораторий и испытательных станций следует разработать и обеспечить исполнение свода правил по технике безопасности (ТБ). Эти правила необходимо обсудить с каждым лицом, назначенным для обслуживания испытательной зоны, и предоставить ему их копию. Необходимо выработать и выполнять процедуру периодического анализа этих правил совместно с операторами.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Использование и применение источника питания****ИСПЫТАНИЯ ПРИ БОЛЬШОМ УРОВНЕ МОЩНОСТИ**

- К испытаниям при большом уровне мощности относится специальный тип высоковольтных измерений при очень большом токе. Вследствие этого необходимо еще более тщательно соблюдать меры по ТБ во время испытаний при большой мощности. Возможность взрыва испытуемого образца требует особого внимания при обеспечении безопасности работы в лаборатории.
- Персонал, проводящий испытания при высокой мощности, или наблюдающий за ними, должен всегда использовать защитное снаряжение для глаз и лица там, где высока вероятность их поражения без использования такого снаряжения.

**ПРИМЕЧАНИЕ.** К типичным факторам риска для глаз и лица в зоне испытаний при высокой мощности относятся сильный свет (включая ультрафиолетовое излучение), искры и расплавленный металл.

- Персонал, наблюдающий за проведением испытаний при высокой мощности, должен носить защитные очки со стеклами, поглощающими вредное излучение, на случай неожиданного появления электрической дуги. Линзы очков должны быть ударопрочными и иметь ту степень затемненности, которая соответствует уровню окружающей освещенности в рабочей зоне, и при этом обеспечивать защиту от опасного излучения, возникающего в случае неожиданного появления электрической дуги.

**ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

- Все высоковольтное оборудование должно иметь единый легкодоступный выключатель для его отключения в экстренных ситуациях.
- На любом высоковольтном оборудовании должны быть установлены индикаторы, указывающие на наличие высокого напряжения на выходе.
- На любом высоковольтном оборудовании должны быть предусмотрены внешние соединения (блокировка), которые при своем размыкании отключают источник высокого напряжения. Такие соединения могут использоваться для защитной блокировки в ограждениях или для защитного выключателя, активируемого рукой или ногой.
- Конструкция любого элемента высоковольтного испытательного оборудования должна разрабатываться с учетом анализа отказов. При этом определяется, создаст ли отказ какой-либо части цепи или испытательного образца, который к ней подключен, опасную ситуацию для оператора. При анализе серьезных отказов должна учитываться вероятность отказа элементов, в которых были бы созданы избыточные нагрузки в результате такого отказа. Анализ может ограничиваться влиянием одного серьезного отказа в любой данный момент времени при условии, что такой отказ очевиден для оператора.

**ПРОВЕРКА СОБЛЮДЕНИЯ ПРАВИЛ ПО ТБ**

- Необходимо выработать и применять методику по периодическому инспектированию зон испытаний. По рекомендациям в результате этих инспекционных проверок должны проводиться корректирующие мероприятия в отношении опасного оборудования или практических методов работы, которые не соответствуют предъявляемым требованиям и нормам.

**ПРИМЕЧАНИЕ.** Принцип формирования комиссии по технике безопасности из нескольких операторов с регулярной ротацией доказал свою эффективность не только с точки зрения инспектирования, но и при разъяснении важности соблюдения правил ТБ всему персоналу.

**ЗАЗЕМЛЕНИЕ И ЗАКОРАЧИВАНИЕ**

- Прокладка и подключение временной проводки должны выполняться таким образом, чтобы при случайном обрыве не создавалось опасности для персонала или оборудования.
- Устройства, для изоляции которых применяется твердый или жидкий диэлектрик, желателно заземлять и замыкать накоротко, когда они не используются.
- По правилам ТБ необходимо, чтобы емкостные объекты замыкались накоротко в следующих ситуациях:
  - На любом неиспользуемом емкостном объекте, на который может влиять электрическое поле постоянного тока, высоковольтный вывод, подвергаемый такому воздействию, должен быть заземлен. Несоблюдение этой меры предосторожности может привести к возникновению напряжения в емкостном объекте в результате воздействия поля.
  - Емкостные объекты с твердым диэлектриком должны замыкаться накоротко после контрольного испытания по постоянному току. Несоблюдение этой меры предосторожности может привести к возникновению напряжения на объекте вследствие рассеяния диэлектрической абсорбции или в периоды, когда объект остается неподключенным к цепи.

**ПРИМЕЧАНИЕ.** Рекомендуется оставлять все емкостные приборы в короткозамкнутом состоянии, когда они не используются.

- Любые емкостные приборы в разомкнутой цепи должны быть замкнуты накоротко и заземлены до того, как к ним будет прикасаться персонал.

**РАСПОЛОЖЕНИЕ**

- Все объекты с потенциалом земли должны быть удалены от точек с высоким напряжением на расстояние не менее 1 дюйма (25,4 мм) на каждые 7500 В, т. е. для 50 кВ потребуются расстояние не менее 6,7 дюйма (171 мм).
- Длина пути тока утечки должна составлять 1 дюйм (25,4 мм) на каждые 7500 В для изоляторов, контактирующих с точками высокого напряжения.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

**Стандартные методики испытания для высоковольтных источников питания**

Ниже приводится обобщенное описание испытаний, которые проводит компания SPELLMAN HIGH VOLTAGE ELECTRONICS в рамках реализации своей программы контроля качества. Указанные обобщенные описания охватывают испытания большого числа различных моделей с самым широким диапазоном выходного напряжения, тока и других эксплуатационных параметров.

Для большинства моделей подготовлены подробные протоколы испытаний. В этих индивидуальных протоколах ясно указаны требования к испытаниям и допустимые приемочные уровни по каждому испытываемому параметру. Дополнительную информацию вы можете получить в техническом отделе/отделе испытаний компании SPELLMAN.

**ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ**

**ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, ПОД КОТОРЫМ МОЖЕТ НАХОДИТЬСЯ ДАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ОПАСНО ДЛЯ ЖИЗНИ!**

Убедитесь в том, что все оборудование **НАДЕЖНО** заземлено.

Не прикасайтесь к соединениям при включенном оборудовании и заряженных внутренних и внешних конденсаторах.

Не прикасайтесь к проводам заземления и не выполняйте работы в условиях повышенной влажности.

Несоблюдение правил техники безопасности может привести к смертельному исходу.

**2.1 Стандартная методика испытания**

Описание обязательных типовых испытаний всех источников питания. Стандартная методика и протокол испытаний содержат параметры для проверки работы источника питания.

**2.2 Чертеж контроля технических требований**

Чертеж контроля может содержать дополнительные проверки либо исключать определенные проверки из стандартной методики испытаний.

**2.3 Методики испытаний конкретной модели**

Эти методики содержат как элементы стандартной методики испытаний, так и элементы чертежа контроля технических требований в дополнение к любым подробным указаниям в отношении проверки работы источника питания.

**3 МЕТОДЫ НАГРУЗКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ**

**3.1 Постоянная нагрузка**

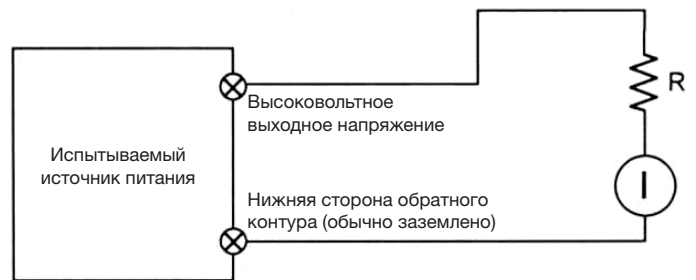


Рис. 2. Схема испытания при постоянной нагрузке

Рис. 2 показывает резистор R, последовательно соединенный с измерителем тока I через клеммы испытываемого источника питания.

**ОСТОРОЖНО.** Для соединения с высоковольтным выходом должен использоваться высоковольтный провод. Если высоковольтного провода нет, можно использовать обычный подвесной провод с соблюдением всех мер предосторожности для исключения контакта с цепями заземления.

Должны быть выбраны резисторы соответствующего напряжения и активной мощности для указанной нагрузки. Необходимо уделить внимание самому монтажу, чтобы не допустить электрического пробоя.

Подходящий измеритель тока I должен быть последовательно соединен с нагрузочным резистором R на линии нижней стороны обратного контура. Это обезопасит прибор, обеспечивая на нем низкий потенциал.

**1 ЦЕЛИ**

Данная методика предназначена для определения обязательных стандартных испытаний всех источников питания, произведенных компанией Spellman High Voltage. Методика предполагает как самостоятельное использование, так и совместное использование с другими методиками.

**2 ИЕРАРХИЯ**



Рис. 1. Структура документа

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

3.2 Переменная нагрузка

3.2.1 Ручной выключатель

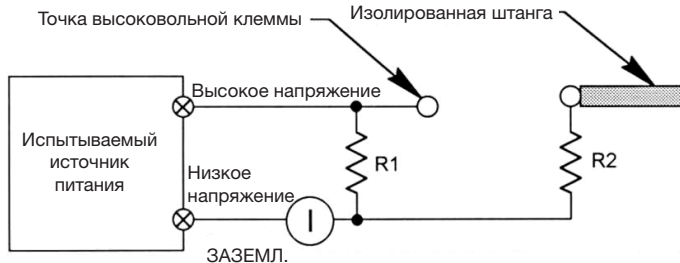


Рис. 3. Схема испытания при переменной нагрузке

Рис. 3 показывает резистор R1, непосредственно соединенный с испытываемым источником питания. Величина R1 выбирается таким образом, чтобы нагрузить испытываемый источник питания, используя определенную минимальную нагрузку. Для условия БЕЗ НАГРУЗКИ, R1 возрастает до бесконечности, и мы имеем разомкнутую цепь.

Величина резистора R2 выбирается таким образом, чтобы получить требуемый режим нагрузки. «Низкая сторона» нагрузки соединяется с измерителем тока, I. «Высокая сторона» резистора R2 подсоединяется подходящим проводником к изолированному штоку или штанге (Рекомендуется «Лексан» или другой акриловый материал). Штанги длиной около метра (три фута) будет достаточно для большинства применений ниже 100 киловольт. Возьмите эту штангу в руку со стороны, противоположной клемме проводника. Это позволит легко и безопасно подсоединить точку высоковольтной клеммы.

Обратите внимание, что когда R2 подсоединен так, как показано, I указывает общий ток нагрузки, на нагрузках R1 и R2.

После окончания измерений отсоедините нагрузку от точки высоковольтной клеммы, вручную удалив изолированную штангу.

**Примечание.** Когда «высокая сторона» R2, а так же и «низкая сторона» не подсоединены к точке высоковольтной клеммы, обе они находятся в безопасности, с низкими потенциалами по отношению к земле, и с ними можно безопасно обращаться.

3.2.2 Переключатель электронно-лучевой трубки

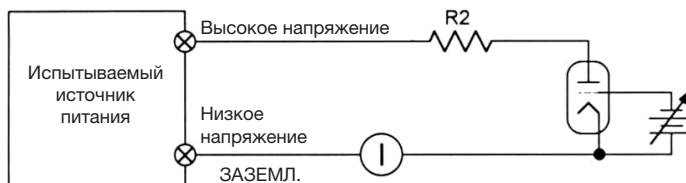


Рис. 4. Переключатель электронно-лучевой трубки

Цепь на рис. 4 показывает вакуумную трубку, которая используется для исключительно быстрого переключения циклов нагрузки из состояния ВКЛ. (ON) в ВЫКЛ. (OFF) и обратно. Если сетка трубки переключается от близкого к нулю смещения до достаточного отрицательного смещения, трубка может управляться как переключатель. Быстрое переключение циклов нагрузки ВКЛ. и ВЫКЛ. при наблюдении характеристик напряжения обычно называется динамической стабилизацией нагрузки. Более детально см. раздел 5.

Кроме этого, трубка может управляться и обеспечивать непрерывную подстройку нагрузки соответствующим изменением сеточного смещения. Смещение можно достаточно просто получить с помощью регулируемого катодного резистора.

Описанный в предыдущих параграфах ручной переключатель используется для источников питания как с положительной, так и с отрицательной полярностью. Цепь электронной трубки на рис. 4 показана для высоковольтных источников питания только с положительной полярностью. Трубка может использоваться для источников питания с отрицательной полярностью при соединении стороны пластины к низкому уровню напряжения, а стороны катода — к высокому. В этом случае, поскольку источники нити накала и решетки будут высоковольтными, необходимо использовать методики изоляции.

4 КАЛИБРОВКА ПО НАПРЯЖЕНИЮ И ДИАПАЗОН

Этот параграф описывает схему для проведения испытания, а также метод измерения выходного напряжения в соответствии с характеристиками, указанными в специальном протоколе испытаний для данного источника питания.

4.1 Схема проведения испытания

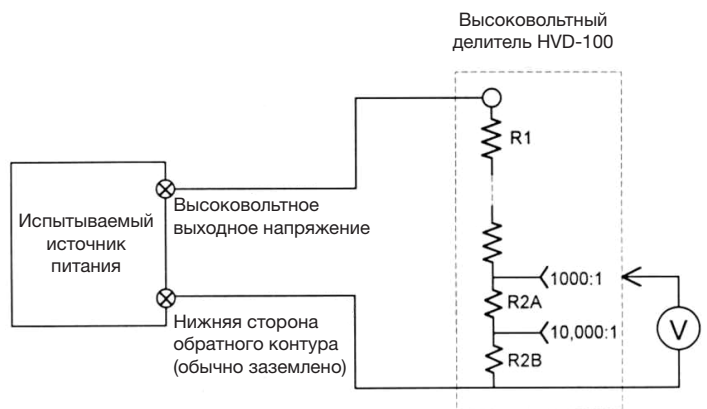


Рис. 5. Схема проведения испытания



## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

#### 4.2 Измерение параметров высоковольтного источника питания

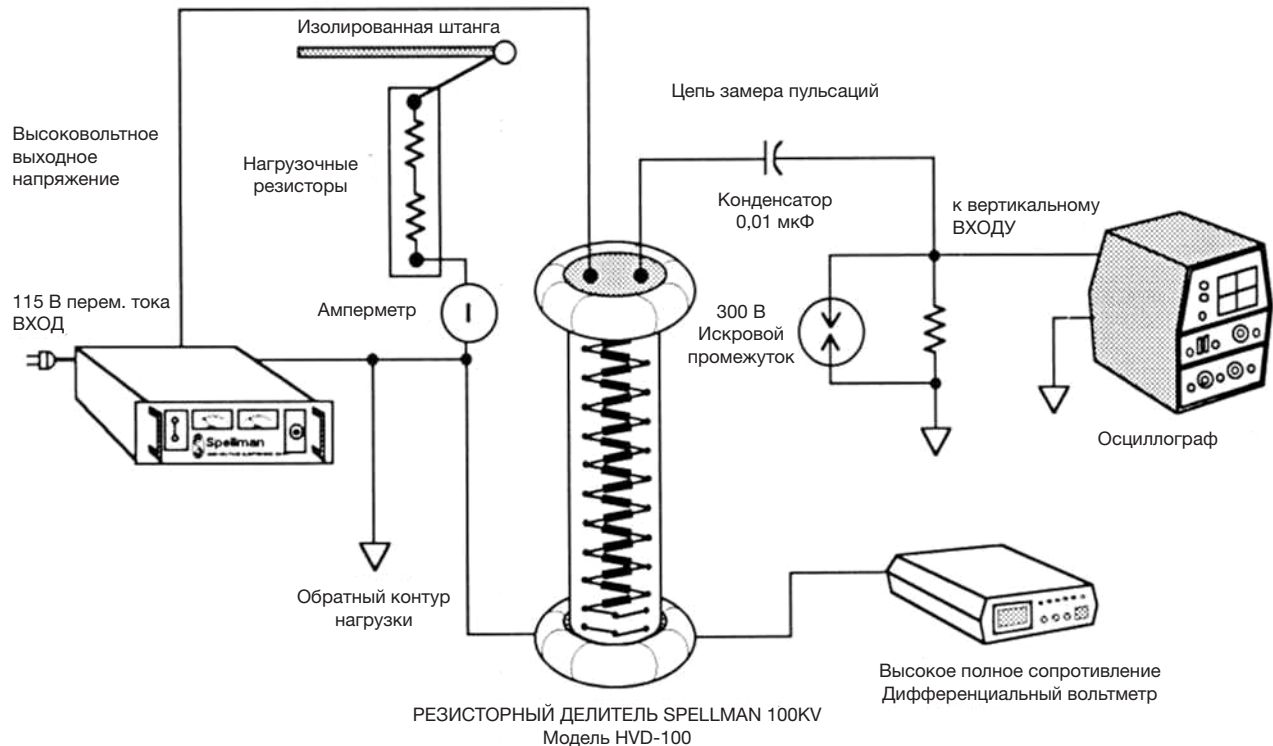


Рис. 6. Испытательная схема высоковольтного источника питания

#### 4.3 Контрольно-измерительные приборы

Прибор, используемый для измерения выходного напряжения делителя, должен иметь большое входное полное сопротивление, чтобы снизить возможные погрешности измерений вследствие влияния нагрузки измерительных приборов на R2A или R2B (рис. 5). Spellman использует любой из двух описанных ниже приборов для измерения (M) в испытательной схеме, рис. 5 или 6, в зависимости от требуемой разрешающей способности.

##### 4.3.1 John Fluke Model 8810A

Точность показаний с учетом устойчивости:  $\pm 0,01\%$  от ввода.

Входное полное сопротивление:  $\geq 1000 \text{ МОм}$  (диапазоны 200 мВ, 2 В, 20 В).

Разрешение: 10 ppm от диапазона.

##### 4.3. John Fluke Model 8 840A

Точность показаний с учетом устойчивости:  $\pm 0,005\%$ .

Входное полное сопротивление:  $\geq 10\,000 \text{ МОм}$  (диапазоны 200 мВ, 2 В, 20 В).

Разрешение: 1 ppm от диапазона.

#### 4.4 Метод испытания

4.4.1 Соединить ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ (HVD) и ВОЛЬТМЕТР как показано на схеме испытания, рис. 6. Соединение между клеммой на выходе высокого напряжения испытываемого источника питания и клеммой на входе высокого напряжения ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ДЕЛИТЕЛЯ следует делать высоковольтным проводником.

4.4.2 Подсоединить испытываемый источник питания к источнику входной мощности в соответствии с техническими данными установки. Соответствующее контрольное оборудование входного напряжения и тока должно быть включено в испытательную схему.

4.4.3 Все необходимые внешние регулирующие и контрольные приборы должны быть соединены в соответствии с техническими данными установки. Используя специальный протокол испытания с указанными требуемыми значениями входного напряжения и заданные величины выходного напряжения, измерьте выходное напряжение в соответствии с описанными выше методиками.

4.4.4 Подать электроэнергию на испытываемый источник питания, соблюдая разумные меры предосторожности при работе с высоким напряжением.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

4.4.5 Измерить напряжение на выходе при соответствующих входных напряжениях, регулируя напряжение с помощью приборов.

4.4.6 Описываемые выше измерения проводятся, по сути, в условиях «БЕЗ НАГРУЗКИ». Это происходит вследствие того, что высоковольтный делитель SPELLMAN имеет полное входное сопротивление 1000 МОм и практически во всех случаях ток нагрузки пренебрежимо мал.

Измерение под нагрузкой при желании можно провести в случае подсоединения соответствующих высоковольтных резисторов нагрузки или других нагрузочных устройств к испытываемому источнику питания, как показано на рис. 6. Измеритель тока подключается последовательно к резистору нагрузки на стороне заземления, чтобы удерживать прибору при безопасном потенциале. ПРИМЕЧАНИЕ. Дополнительную информацию о методах нагрузки см. в разделе 3.

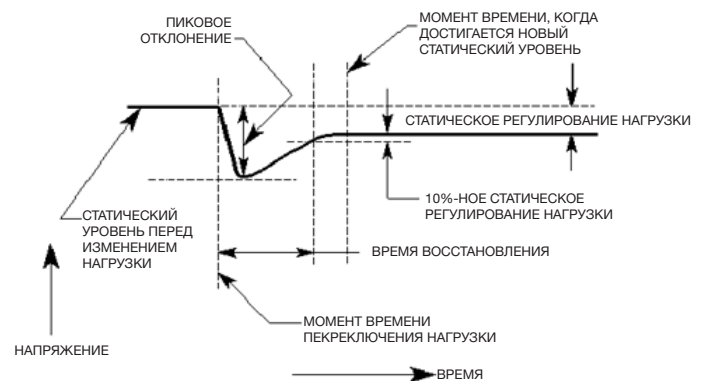


Рис. 7. Формы сигналов статической и динамической стабилизации

## 5 СТАБИЛИЗАЦИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ, СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ

### 5.1 Определение

Как правило, большинство производителей источников питания в США используют термин «стабилизация» в значении изменения выходного напряжения, которое непосредственно происходит при изменениях во входном источнике энергии и (или) нагрузочном сопротивлении.

Кроме того, «стабилизация», по определению Spellman и большинства других производителей, исключает изменения вследствие изменений температуры и времени. Таким образом, стабилизация измеряется при «постоянной температуре» и «коротких» промежутках времени, где под «коротким» промежутком времени понимается время, необходимое для проведения измерения.

В дополнение к двум основным компонентам «стабилизации», т.е. стабилизации по нагрузке и стабилизации сети, стабилизация далее делится на статическую или динамическую.

Динамическая стабилизация связана с переходной реакцией выходного напряжения вследствие изменения нагрузки или изменения в сети. Интерес представляют пиковые отклонения и время восстановления. Spellman определяет время восстановления как время, требуемое на возврат из точки пикового отклонения к точке в пределах 10 % от нового статического уровня. Эскиз внизу детально это иллюстрирует.

### 5.2 Схема испытания, СТАТИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ

5.2.1 Соедините выходную цепь вольтметра как описано в разделе 4.

5.2.2 Подсоедините испытываемый источник питания к источнику входной мощности в соответствии с тех. данными установки. Соответствующее контрольное оборудование входного напряжения и тока должно быть включено в испытательную схему. Обеспечьте регулировку мощности на входе — в соответствии с требованиями техническими данными.

5.2.3 Выберите метод нагрузки (как описано в разделе 3), который подходит в соответствии с техническими данными установки. Сделайте необходимые соединения.

### 5.3 Метод испытания, СТАБИЛИЗАЦИЯ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

5.3.1 Удерживая входное напряжение постоянным, совершите указанные изменения в нагрузке, используя одну из методик раздела 3.

5.3.2 Наблюдайте за изменениями напряжения на выходе по показаниям монитора напряжения. Запишите показание для состояния «НАГРУЗКА ВКЛЮЧЕНА».

5.3.3 Повторите для состояния «НАГРУЗКА ВЫКЛЮЧЕНА».

5.3.4 Указанные выше измерения можно проводить в условиях минимального, максимального и номинального входного напряжения в соответствии с техническими данными установки. Их также можно выполнить при других определенных условиях напряжения на выходе.

### 5.4 Метод испытания, СТАТИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ

5.4.1 Используется та же схема, что и в разделе 5.2 выше.

5.4.2 Установите уровень выходного напряжения и нагрузку в соответствии со спецификаций, отрегулируйте входное напряжение от минимума до максимума.

Наблюдайте за изменениями напряжения на выходе по показаниям монитора напряжения. Зарегистрируйте.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

**5.5 Метод испытания, СТАБИЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

- 5.5.1 Соедините контроллер выходного напряжения, как описано в разделе 5.
- 5.5.2 Удерживая входное напряжение постоянным на уровне номинальных величин, установите необходимую нагрузку с прямоугольным сигналом или импульсную нагрузку.
- 5.5.3 Проверьте, чтобы ток нагрузки правильно переключался, и наблюдайте за формой сигнала тока на токоуловствительном резисторе на «нижней стороне» обратного контура источника питания.
- 5.5.4 Наблюдайте за динамической реакцией выходного напряжения, используя контрольный прибор пульсации, как показано на рис. 12.
- 5.5.5 Зарегистрируйте результаты.

**5.6 Метод испытания, ДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ**

- 5.6.1 Удерживая ток нагрузки на постоянном уровне, установите необходимые характеристики переключения напряжения на входе.
- 5.6.2 Наблюдайте за динамической реакцией выходного напряжения, используя контрольный прибор пульсации, как показано на рис. 12.
- 5.6.3 Зарегистрируйте результаты.

**6 СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОКА НА ВЫХОДЕ**

- 6.1 Этот параметр источника питания относится к источникам «постоянного» или «стабилизированного тока». При этих испытаниях учитываются все аспекты «стабилизации», как описано в разделе 5 выше, за исключением метода измерения.

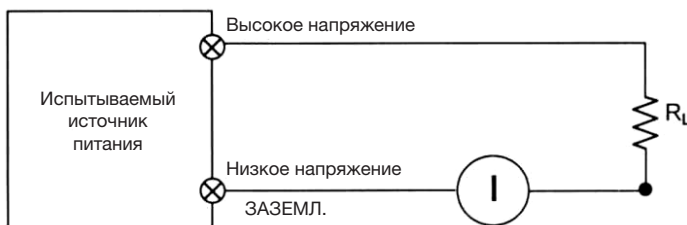


Рис. 8. Нестабильность тока

На Рис. 8 сопротивление нагрузки представлено как  $R_L$ . В источнике стабилизации тока сопротивление резистора нагрузки  $R_L$  меняется от нуля, в условиях короткого замыкания, до некоторой конечной величины при условиях номинального напряжения на выходе. Очевидно, что источник не может поддерживать стабилизацию в разомкнутой цепи. Поэтому изменения нагрузки осуществляются «закорачиванием» части номинального резистора нагрузки. Измеритель тока, последовательно подсоединенный к «низкой стороне» источника питания, используется для контроля тока.

**7 ОГРАНИЧИТЕЛЬ ТОКА**

- 7.1 Этот параметр источника питания относится к источникам питания, которые, хотя не стабилизируются по току, имеют схемы, ограничивающие абсолютную величину тока на выходе.
- 7.2 На рис. 8 видно, что резистор  $R_L$  закорочен и источник питания включен. Ток на выходе прослеживается до его пиковой величины, и эта величина обычно составляет 110 % от номинального тока на выходе.

**8 КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ**

- 8.1 Это испытание проводится для имитации условий дугового разряда.

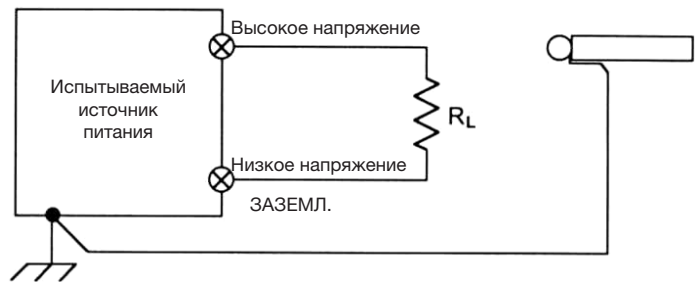


Рис. 9. Испытание на дугу/короткое замыкание

С помощью палочки из плексигласа с проводником, соединенным на землю проводом #4, испытываемый источник питания с полным выходным напряжением проверяется в состоянии короткого замыкания.

**9 ВХОДНОЙ ТОК**

- 9.1 Входной ток относится к току, который испытываемый источник питания потребляет от своего источника питания (либо постоянный ток низкого напряжения, либо переменный ток из сети) при работе на полной мощности.

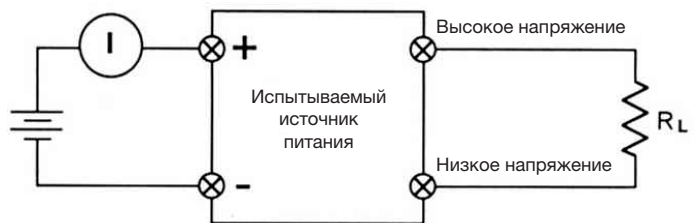


Рис. 10. Измерение входного постоянного тока

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

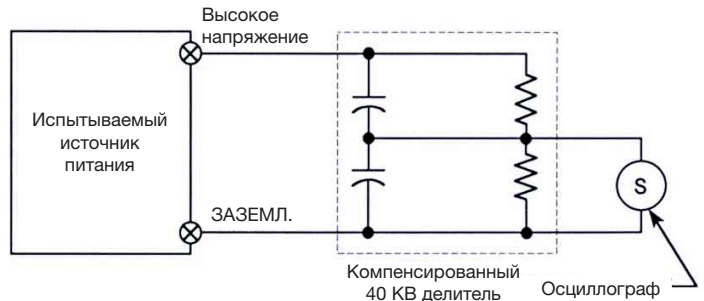
**Использование и применение источника питания**

Погрешность измерения пульсации 60 Гц для  $C > 0,01$  мкФ и  $R = 1$  до 10 МОм исключительно мала. Для высокочастотных компонентов будут приемлемы пропорционально меньшие величины емкости.



**Рис. 11. Измерение входного переменного тока**

Цифровой мультиметр последовательно соединяется либо с положительным выходом источника, либо с проводником «ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ» от источника переменного тока, и на источник питания подается электроэнергия. Параметр измеряется при 100%-м номинальном токе на выходе и на входе.



**Рис. 13. Измерение пульсации**

Рис. 13 показывает использование компенсированного 40 кВ делителя для измерения пульсации. Хотя компенсированный делитель позволяет проводить точные измерения, у него есть два недостатка. Во-первых, нельзя провести точные измерения пульсации без нагрузки, так как сам делитель имеет входное сопротивление 100 МОм.

Во-вторых, при относительно низкой выходной пульсации источника питания отношение делителя 1000:1 может ослабить переменную составляющую тока на выходе делителя до трудночитаемого уровня.

**10.2 Метод испытания**

10.2.1 Задайте все рабочие параметры, требуемые для указанной установки. В число этих рабочих параметров должны быть включены:

Заданное выходное напряжение

Условие по току нагрузки

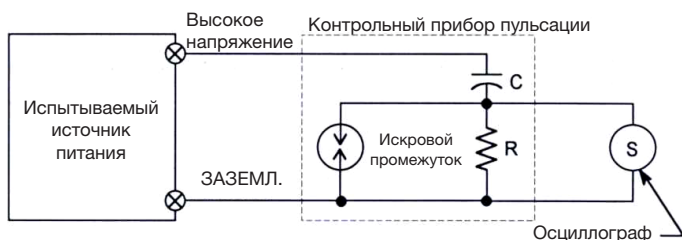
Условие по входному напряжению

10.2.2 Измерьте на осциллографе пульсацию от пика-к-пика в вольтах. Зарегистрируйте.

10.2.3 Разделите измеренную величину от пика к пику на  $2\sqrt{2}$ , когда нужны показания в среднеквадратичных величинах (если пульсация синусоидальная).

**10 ПУЛЬСАЦИИ**

**10.1 Методики замера пульсации**



**Рис. 12 Измерение пульсации**

Рис. 12 показывает методику использования разделительного конденсатора по постоянному току C, последовательно соединенного с клеммой на выходе источника питания, для подачи прямо на осциллограф переменной составляющей тока в выходном напряжении S. Резистор R и искровой зазор SG защитят осциллограф от пульсаций выходного напряжения, которые могут передаться прямо через разделительный конденсатор на осциллограф.

Величины C и R должны быть выбраны так, чтобы пропустить интересующие нас частоты пульсаций с ничтожно малым затуханием. Входное полное сопротивление и частотная реакция осциллографа также вносят погрешность, которую необходимо учитывать.

## Описание высоковольтных источников питания

Дерек Чэмберз и Клифф Скейпелатти

### ВВЕДЕНИЕ

При описании стабилизированных высоковольтных источников питания для особого применения необходимо помнить, что благодаря новейшим технологическим достижениям в этой области последние модели стали компактнее, легче и производительнее, чем они были всего несколько лет назад. Обычно приборы новой конструкции работают на высоких частотах в диапазоне от 20 до 100 кГц и повсеместно фактически заменили собой все приборы, работающие на частоте сети даже при высоких уровнях мощности.

Все высоковольтные источники питания должны эксплуатироваться персоналом, хорошо знакомым с опасностями, связанными с высоким напряжением. Источники высокого напряжения могут таить в себе смертельную опасность! Общие принципы обеспечения безопасности приводятся стандарте IEEE 510-1983 «Практические рекомендации по безопасности при испытаниях высоковольтного оборудования и оборудования большой мощности».

### Два основных фактора, которые привели к таким изменениям:

- Наличие ключевых силовых компонентов, которые отличаются малыми потерями при работе на высокой частоте.
- Разработка методов резонансного преобразования мощности.

### К ключевым силовым компонентам относятся следующие:

- Более быстрые коммутирующие устройства (т.е. транзисторы, высокоомощные МОП-транзисторы, БТИЗ, тринисторы).
- Материалы сердечников с низкими потерями на базе феррита и порошкового железа для сердечников дросселей и трансформаторов.
- Конденсаторы с низкими коэффициентами рассеяния.
- Быстродействующие выпрямители с низким падением напряжения в режиме прямого тока.

### К передовым методам преобразования относятся:

- Последовательные и параллельные резонансные переключающие инверторы, срабатывающие при нулевом токе (непрерывный режим работы).
- Резонансные инверторы с LCC-контуром, обеспечивающим коммутацию при нулевом напряжении (непрерывный режим).

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

- Программнокоммутируемые и фазоуправляемые резонансные инверторы.
- Квазирезонансные инверторы обратного хода и импульсные инверторы.

По сравнению с работой на частоте сети, высокие частоты обеспечивают следующие преимущества в стабилизированных высоковольтных источниках питания:

- Меньшие размеры и вес
- Более высокое быстродействие
- Меньшая накапливаемая энергия
- Более высокая эффективность



*В высоковольтных источниках питания, таких как эта модель с несколькими выходами, используются более эффективные и более производительные компоненты и методы преобразования мощности в целях снижения веса и улучшения характеристик.*

### ТЕХНОЛОГИЯ

Основной элемент любого высокочастотного источника питания — генератор (или инвертор), который используется для управления выходным трансформатором. Существует множество специальных конструкций, применяемых в сфере высоковольтных источников питания, и невозможно рассмотреть их все в рамках данной статьи, поскольку каждый изготовитель разработал свои собственные силовые схемы коммутации. Тем не менее при выборе топологии генератора или инвертора необходимо учитывать один фактор, который характеризует все высоковольтные источники питания. емкость, которая существует на вторичной обмотке повышающего трансформатора, должна быть изолирована с тем, чтобы исключить ее непосредственное влияние на силовые полупроводниковые переключатели. Эту развязку можно выполнить разными способами:

- С использованием обратных цепей.
- С использованием индуктивности или последовательного резонансного контура между переключателями и трансформатором.
- Путем включения достаточной индуктивности рассеяния между первичной и вторичной обмоткой трансформатора.
- За счет работы генератора на собственной резонансной частоте.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Использование и применение источника питания**

Эти технические параметры рассматриваются в следующем порядке:

- Входное напряжение
- Выходное напряжение
- Выходной ток
- Пульсации
- Стабильность
- Накопление энергии
- Импульсный режим работы
- Нестабильность выходного напряжения по сети
- Нестабильность выходного напряжения по нагрузке
- Относительное перерегулирование
- КПД



*Высоковольтные источники питания повышенной мощности, такие как приборы компании Spellman High Voltage Electronics Corporation серии SL с номинальной мощностью до 1200 Вт, работают от сети переменного тока.*

**ВХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ**

Входной источник питания для конкретной модели определяется многими факторами, включая допустимую мощность на выходе источника, и формой энергии, доступной для применения. Обычно высоковольтные источники питания с малой мощностью на выходе — в диапазоне 1–60 Вт — получают питание от источников постоянного тока с напряжением 24 В или 28 В, в то время как более мощные блоки питания работают от сети переменного тока.

**Вход постоянного тока**

Во многих областях применения комплектного оборудования высоковольтный источник питания представляет собой лишь часть электронной системы, в которой уже имеются источники постоянного тока (например, 24 В пост. тока, 390 В пост. тока). Эти имеющиеся источники постоянного тока могут также использоваться для питания высоковольтных источников питания. Такая компоновка удобна и экономична для модульных блоков питания, работающих на низких уровнях мощности.

На выбор топологии генератора также влияет уровень мощности источника питания. Например, с прибором меньшей мощности для применения с фотоумножителем может использоваться генератор с обратной цепью или генератор, работающий на собственной резонансной частоте, в то время как на моделях более высокой мощности (например, более киловатта), скорее всего, будет использоваться возбуждаемый инвертор, питающий выходной трансформатор через индуктор или последовательный резонансный контур. Часть конструкции трансформатора может быть также реализована как контур силового резонансного инвертора.

При правильно разработанной конструкции резонансного конвертера появляется возможность получить следующие необходимые характеристики:

- Переключение при нулевом токе, которое улучшает КПД и снижает потери при коммутации в устройствах высокой мощности.
- Синусоидальная форма волны тока в силовом контуре инвертора, что в значительной степени снижает влияние радиочастотных помех, обычно ассоциируемых с техникой широтно-импульсной модуляции.
- Простота параллельного подключения источников питания для получения более высокой выходной мощности.
- Характерное ограничение тока и защита от короткого замыкания последовательных резонансных инверторов.

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Вероятно, наиболее распространенная ошибка, которую совершают инженеры при определении характеристик высоковольтного источника питания, — это превышение требований по выходной мощности, пульсациям, температурной устойчивости и размерам. Такое завышение требований к техническим характеристикам может приводить к излишне высокой стоимости, а также понижать надежность из-за возросшей сложности и более высокой плотности мощности. В случае несоответствия отдельных параметров в спецификации каталога конкретной области применения необходимо проконсультироваться со специалистами завода-изготовителя.

**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИФИКАЦИЙ**

Спецификации, которые предоставляются изготовителем источников питания, обычно включают в себя информацию о входном и выходном напряжении, регулировании выходного напряжения, его стабильности и пульсации. В большинстве случаев пользователям будет полезно получить более детальную информацию. В следующих разделах параметры источников питания рассматриваются более подробно, чем обычно на стандартном листе технических данных. В них включены определения и описания требований, с которыми сталкиваются пользователи высоковольтных источников питания.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Использование и применение источника питания****Вход переменного тока**

Большинство модулей высокой мощности более 100 Вт и моделей стоечного типа спроектированы для работы от сети переменного тока. Эти источники питания рассчитаны на работу от сети с теми характеристиками, которые обычно представлены в месте расположения пользователя. А они могут иметь значительные различия в разных частях мира.

В Соединенных Штатах и Канаде используется стандартное однофазное напряжение –115/230 В перем. тока при частоте 60 Гц, в то время как в континентальной Европе и во многих других частях света стандартное напряжение составляет 220 В перем. тока при частоте 50 Гц. В Великобритании стандартом являются 240 В перем. тока при частоте 50 Гц, а в Японии — обычно 100 В при частоте 50 или 60 Гц. На большинстве источников питания имеются отводы обмотки трансформатора, перекрывающие этот диапазон, в то время как некоторые новые конструкции перекрывают диапазон 90–130 и 180–260 В перем. тока без отводов трансформатора. Все страны Европейского экономического сообщества намерены, в конечном счете, прийти к одному стандарту в 230 В при 50 Гц.

Коррекция коэффициента мощности и универсальный вход при уровнях мощности менее 3 кВт могут быть заданы для большинства стандартных высоковольтных источников питания. Источники с более высокой мощностью должны изготавливаться под заказ.

**ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ**

Как правило, высоковольтные источники питания предназначены для бесперебойной работы при максимальном выходном напряжении, определенном в технических данных. Лабораторные стендовые модели и высокоомощные блоки для стоечного монтажа обычно регулируются по полному диапазону напряжения от нуля до максимального указанного выходного напряжения. В этих моделях выходное напряжение указывается либо на цифровых, либо на аналоговых измерительных приборах, как определено в спецификациях. С другой стороны, модульные источники питания могут иметь либо предварительно заданное выходное напряжение, либо узкий диапазон настройки. Вместо вольтметров на них могут иметься контрольные клеммы для измерения напряжения. В большинстве случаев экономически невыгодно определять источник питания с выходным напряжением, более чем на 20 % превышающим максимальное напряжение, фактически необходимое для конкретного применения.

**ВЫХОДНОЙ ТОК**

Как правило, источники питания предназначены для непрерывного режима работы при полном значении тока, указанном в технических данных. Ограничение по току обычно предусматривается в конструкции с тем, чтобы ток перегрузки не превышал около 110 % от расчетного максимального значения выходного тока. Обычно указывается наличие устройства выключения при перегрузке, которое

используется для выключения источника питания в случае превышения нормального значения выходного тока. Возможность регулирования тока имеется на большинстве мощных модулей стоечного типа. Это позволяет контролировать выходной ток с помощью потенциометра на передней панели или из удаленного источника и обеспечивает автоматический переход к режиму стабилизации напряжения, когда ток нагрузки ниже запрограммированного значения.

**ПУЛЬСАЦИИ**

В качестве пульсаций могут определяться те части выходного напряжения, которые гармонически связаны как с входным напряжением сети, так и с внутренней частотой генератора. В конструкциях высокочастотных коммутаторов это результат объединения двух частот, а именно компонентов, работающих на частоте сети, и компонентов, работающих на частоте коммутации. Полные пульсации определяются как среднеквадратичное значение или как удвоенная амплитуда комбинированной частоты сети и частотных составляющих генератора и обычно выражается в виде процента от максимального выходного напряжения.

Величина пульсаций, которая считается допустимой для различных применений, варьируется от чрезвычайно низких значений (например, менее 0,001 % полной амплитуды в фотомножителе, КИП ядерного реактора и при использовании ламп бегущей волны) до нескольких процентов, когда выходная мощность может интегрироваться по времени, как, например, в случае электрофильтров и при сварке электронным пучком.

Обычно высокочастотную пульсацию можно уменьшить путем добавления емкости на выходе. С другой стороны, когда требуются характеристики быстрого срабатывания, значение емкости на выходе, вероятно, придется уменьшить. В критических случаях компромисс между максимальной скоростью нарастания выходного напряжения и пульсациями должен быть найден совместно заказчиком и изготовителем источника питания.

**Пульсации на частоте сети:**

При работе от входного источника переменного тока пульсации на частоте сети могут составлять значительную часть пульсации полной амплитуды. Как правило, источник питания проектируется таким образом, чтобы величина высокочастотной пульсации равнялась пульсации на частоте сети при работе в режиме полной выходной мощности. Следует отметить, что в большинстве конструкций величина пульсаций на частоте сети ослабляется и контролируется по обратной связи в схемах стабилизации, ширина полосы пропускания которых обычно включает в себя частоту пульсации.

**Пульсации на частоте коммутации:**

В стабилизированных источниках питания, на вход которых подается постоянный ток, пульсаций на частоте сети не существует, а частота пульсации просто определяется частотой коммутации или частотой генератора источника питания. Для снижения пульсации по частоте коммутации на выходе могут

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Использование и применение источника питания****НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ**

Энергия, накопленная на выходе высоковольтного источника питания, может быть опасной для эксплуатирующего персонала, особенно при высоких напряжениях, поскольку значение этой энергии является функцией от квадрата напряжения и значения емкости на выходе. Определенные типы нагрузки, такие как рентгеновские трубки, также могут быть легко повреждены чрезмерной энергией, запасенной в высоковольтном источнике питания, при образовании дуги. В источниках питания, работающих на высокой частоте, в отличие от источников питания, работающих на частоте сети, могут использоваться намного меньшие значения сглаживающих конденсаторов, и, таким образом, риски поражения электрическим током снижаются. Однако следует отметить, что источники питания с низкой пульсацией, на которых используются дополнительные фильтрующие конденсаторы на выходе, отличаются соответственно большим количеством аккумулированной энергии. По сравнению с источником питания, работающим на частоте сети, у импульсного источника питания, работающего на частоте 60 кГц, накапливается лишь доля запасенной энергии от значения запасенной энергии эквивалентного источника питания, работающего на частоте сети, поскольку значение емкости на выходе на нем может быть уменьшено в 1000 раз.

**ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ**

В то время как некоторые источники питания предназначены для работы с постоянным током, другие могут использоваться в областях, использующих импульсные источники питания. В большинстве случаев пиковый импульсный ток обеспечивается энергонакопительным конденсатором, расположенным внутри или вне источника питания, а источник питания восстанавливает заряд между импульсами. Источник питания работает в токовом режиме во время периодов импульса и подзарядки цикла и возвращается в режим напряжения перед следующим импульсом тока нагрузки. В целом импульсные нагрузки подразделяются на три категории:

- Очень узкие импульсы (от 1 до 10 мкс), со скажностью 0,01–1 %.
- Более длинные импульсы (от 100 мкс до 1 мс) со скажностью в диапазоне 0,05–0,2 %.
- Очень длинные импульсы (от 50 мс до 5 с) со скажностью в диапазоне 0,1–0,5 %.

С импульсами первой категории работают радары, когда генерируются узкие импульсы длительностью порядка микросекунды с типичной частотой следования в диапазоне от 500 Гц до 5 кГц.

использоваться дополнительные фильтрующие элементы или (иногда) электронные схемы вычитания импульсов. Когда добавляются фильтрующие компоненты, такие как шунтирующие конденсаторы или последовательно включенные сопротивления либо катушки индуктивности для снижения пульсации, они создают задержку в схемах цепи управления, что негативно сказывается на характеристиках реакции блока питания при изменениях условий на входе или выходе. В таких случаях значения компонентов, которые управляют фазой сигнала в контуре обратной связи, изменяются на заводе-изготовителе для поддержания стабильной работы.

Если для применения требуются особо малые значения пульсации либо по высокой частоте, либо по частоте сети, то обычно можно обеспечить низкий уровень пульсации на одной из этих частот за счет увеличения пульсации на других частотах. В этих особых случаях до размещения заказа необходимо обсудить требования с изготовителем оборудования.

**СТАБИЛЬНОСТЬ**

На стабильность выходных параметров стабилизированного источника питания влияют следующие факторы:

- Дрейф опорного напряжения.
- Изменения напряжения смещения в управляющих усилителях.
- Дрейф коэффициента трансформации по напряжению делителя обратной связи.
- Дрейф значения токочувствительного сопротивления.

Все эти изменения являются функциями от температуры. Стабильность правильно выбранного эталонного прибора обычно составляет менее 5 м.д., а погрешности смещения могут быть фактически устранены тщательным выбором управляющего усилителя. Именно поэтому делитель напряжения и токочувствительное сопротивление оказываются критическими элементами, влияющими на стабильность выходного напряжения и тока.

Так как эти компоненты чувствительны к изменениям температуры, их отбирают, основываясь на том, что они должны работать на доле своей допустимой мощности. При этом они должны располагаться на удалении от горячих компонентов. Однако поскольку источник питания нагревается и температура окружающей среды вокруг компонентов увеличивается, появляются небольшие изменения в коэффициенте трансформации делителя напряжения и в значении токочувствительного сопротивления, которые могут повлиять на стабильность.

Значения стабильности, как правило, приводятся после указанного периода разогрева (обычно спустя 1/2 часа). Хорошей стабильности можно достичь за счет использования делителя с низким значением температурного коэффициента, хотя это приводит к удорожанию продукции.



## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

относительно длительных периодов времени. К типичным сферам применения относятся медицинские рентгеновские системы, лазеры и дисплеи на базе высоковольтных ЭЛТ. Для пользователя очень важно полностью определить условия фактической нагрузки прежде, чем размещать заказ.



*Компактный мощный модуль обеспечивает до 350 Вт в непрерывном режиме или 600 Вт в импульсном режиме для тестирования проекционного ТВ и ЭЛТ. От 1 до 70 кВ с возможностью программирования и мониторинга напряжения и тока.*

Вторая категория охватывает более широкий диапазон применений, таких как источник питания импульсного электромагнита или тестирование кабеля, когда большая часть импульсного тока нагрузки все еще обеспечивается конденсатором, подключенным на выходе. В большинстве случаев для обеспечения надежной работы в этих областях применения необходимы некоторые изменения в выходных и управляющих цепях, а динамические характеристики нужно более детально обсудить с изготовителем.

Для третьей категории требуется специально спроектированный источник питания, который может выдавать ток, превышающий среднее расчетное значение в течение

### НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО СЕТИ

Нестабильность выходного напряжения по сети выражается как процентное изменение в выходном напряжении при определенном изменении напряжения в сети, обычно при колебании напряжения в сети на  $\pm 10\%$ . Измерение выполняется при максимальном выходном напряжении и при токе максимальной нагрузки, если не указано иное. Нестабильность выходного напряжения по сети у большинства высоковольтных источников питания лучше 0,005 %.

### НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО НАГРУЗКЕ

Нестабильность выходного напряжения по нагрузке определяется при полном выходном напряжении и номинальном напряжении сети и выражается как изменение выходного напряжения при определенном изменении тока нагрузки (обычно от нулевой до максимальной нагрузки). Типичная нестабильность выходного напряжения по нагрузке большинства высоковольтных источников питания лучше 0,01 %.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

**Высоковольтные источники питания для аналитической аппаратуры**

Клифф Скейпелатти

**БАЗОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ**

А. На рис. 1 представлены базовые структурные компоненты большинства высоковольтных источников питания. Входной каскад питания обеспечивает предварительную обработку питания на входе. Источник питания на входе может отличаться большим разбросом характеристик входного напряжения. Часто встречаются источники переменного тока с частотой от 50 до 400 Гц при напряжении от 24 до 480 В. Разброс по напряжению у источников постоянного тока может составлять от 5 до 300 В. Силовой каскад может обеспечивать выпрямление и фильтрацию сигналов переменного тока, фильтрацию сигналов постоянного тока и защиту цепи. Кроме того, к типичным функциям входного силового каскада относится подача питания на цепи управления высоковольтных источников питания через вспомогательные блоки питания. Для конструктора КИП очень важно уметь разбираться в конфигурациях входных цепей. Требования по входному питанию влияют на конструкцию всего прибора, требования заказчика и даже нормативные требования.

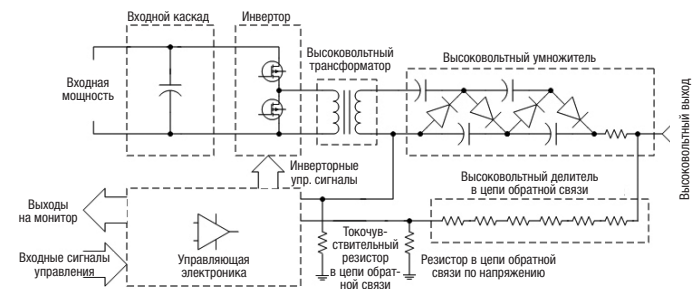


Рис. 1. Базовый высоковольтный источник питания

В. На выходе каскада предварительной обработки входного питания обычно находится источник питания постоянного напряжения. Это постоянное напряжение служит источником энергии для инверторного каскада. Инверторный каскад преобразует сигнал с источника постоянного тока в сигнал переменного тока. Для источников питания используется много различных топологий инверторов. Однако в случае ВИП необходимо учитывать несколько факторов, от которых зависит выбор наиболее удачного подхода.

Как правило, инвертор генерирует высокочастотный сигнал переменного тока, который повышается высоковольтным трансформатором. Генерирование высокочастотного тока обеспечивает высокоэффективную работу системы при уменьшенных размерах магнитных сердечников и накопительных конденсаторов. Проблема возникает тогда, когда трансформатор с высоким коэффициентом повышения подключается к высокочастотному инвертору. Высокий коэффициент повышения создает паразитную емкость первичной обмотки высоковольтного трансформатора. Это отражается на функции  $(N_{sec}:N_{pri})^2$ . Необходимо обеспечить развязку этой большой паразитной емкости на первичной обмотке

**КРАТКИЙ ОБЗОР**

Требования к источникам питания для аналитической аппаратуры (КИП) так же разнообразны, как и сами применения. Напряжения источников питания могут находиться в диапазоне 3 до 300 000 В в зависимости от типа аппаратуры. В то время как большинство требований по напряжению могут удовлетворять имеющиеся в продаже изделия, требования по высокому напряжению обычно реализуются в конструкциях, спроектированных по индивидуальному заказу для особой области применения. Высоковольтные источники питания, спроектированные по индивидуальному заказу, применяются в КИП для спектроскопии, капиллярного электрофореза, масс-спектрометрии, электрораспыления, лазеров, спектрометров, рентгеновской дифракции, флуоресценции, а также во многих других областях аналитического построения и обработки изображений.

При любом применении высоковольтного питания требуется особое внимание к критическим переменным. К числу важных факторов, которые определяют достоверность получаемых научных данных, относятся пульсация напряжения, долговременная и краткосрочная стабильность, повторяемость и точность. Кроме этого, в связи с тем, что аналитические КИП все более широко внедряются в управление производственным процессом, надежность и качество играют не менее важную роль при рассмотрении характеристик высоковольтных источников питания.

Проектировщикам, разработчикам спецификаций и пользователям высоковольтных источников питания для аналитических КИП предлагаются для рассмотрения специфические вопросы по техническим характеристикам и современные технические разработки.

**ВВЕДЕНИЕ**

Высоковольтные источники питания (ВИП) — ключевые компоненты многих аналитических приборов. Учитывая специфику аналитических применений, испытательное оборудование, методы и данные должны обеспечивать стабильные результаты. Высоковольтный источник питания, как наиболее важный компонент в измерительном приборе, также должен обеспечивать устойчивую работу. ВИП обладают некоторыми уникальными особенностями, которые отличают их от обычных источников питания. Знание и понимание этих особенностей обеспечивают дополнительное преимущество как разработчикам, так и пользователям.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

трансформатора от переключающих устройств инвертора. В противном случае на инверторе будут присутствовать аномально высокие импульсные токи.

Другой параметр, который часто встречается на ВИП, — это широкий диапазон работы под нагрузкой. Вследствие использования высокого напряжения часто наблюдаются такие явления, как пробой изоляции, т.е. дуга в трубке. Показатели надежности инвертора и характеристики контура управления должны учитывать практически любую комбинацию обрыва в цепи, короткого замыкания и условий рабочей нагрузки.

В дополнение к широкому диапазону изменения нагрузки практически все аналитические приборы должны различать очень низкие уровни сигнала и иметь схемы с большим коэффициентом усиления. При этом нужно учитывать источники шумов, такие как инверторы источников питания. Инвертор вполне может быть источником помех вследствие высоких значений коэффициентов  $DI/Dt$  (допустимая скорость нарастания тока) и  $DV/Dt$  (допустимая скорость нарастания напряжения), которые наблюдаются при включении и выключении силовых элементов инвертора. Наилучший метод уменьшения шума — это применение резонансной топологии коммутации. При этом также важно обеспечить низкие пульсации на выходе, низкий уровень пульсации на входе источника питания и использовать надежные методы экранирования.

Все эти проблемы, в том числе надежность и стоимость, должны решаться в рамках в топологии инвертора ВИП.

С. С исторической точки зрения, высоковольтный трансформатор — это тот модуль, в котором осуществляются «магические процессы». В реальности нет никакой магии. Полное понимание конструкции магнитных сердечников должно сочетаться с активным управлением материалами и процессами. К области специфической компетенции относится управление вторичной обмоткой с большим количеством витков и пиковым напряжением вторичной обмотки. Из-за этих двух факторов геометрия сердечника, методы изоляции и намотки витков в значительной степени отличаются от конструктивных решений обычных трансформаторов. Некоторые проблемы могут создавать коэффициент трансформации вторичной обмотки, характеристики изоляции между слоями обмоток, коэффициент рассеяния материала, геометрия обмоток из-за наличия паразитной емкости на вторичной обмотке и потока рассеяния, пропитка слоев обмотки изоляционным лаком, уровень эффекта коронирования и фактически другие обычные задачи, такие как запас по тепловой нагрузке и общая стоимость.

D. Функциональное назначение высоковольтного выходного каскада заключается в выпрямлении и фильтрации высокочастотного сигнала переменного тока, который поступает с высоковольтной вторичной обмотки трансформатора (рис. 2). Для этого процесса выпрямления и фильтрации в различной степени используются высоковольтные диоды и высоковольтные конденсаторы. При этом конфигурации компонентов значительно различаются. Для выходов низкой мощности используются

стандартные умножители напряжения. Для высокой мощности успешным может быть применение модифицированных умножителей напряжения и различных методов использования трансформаторов. Высоковольтный выходной каскад также формирует сигналы обратной связи и контрольные сигналы, которые обрабатываются цепями управления источника питания. Обычно все эти элементы изолированы от «земли» для предотвращения дугового пробоя. Для этого используются самые разнообразные изоляционные материалы. Наиболее типичными являются воздух,  $SF_6$ , электроизоляционное масло, твердая заливка (клей-герметик, вулканизирующийся при комнатной температуре (RTV)), эпоксидная смола и т.д.). Выбор изоляционного материала и управление процессом, вероятно, можно назвать наиболее важными аспектами надежной конструкции высоковольтного прибора.

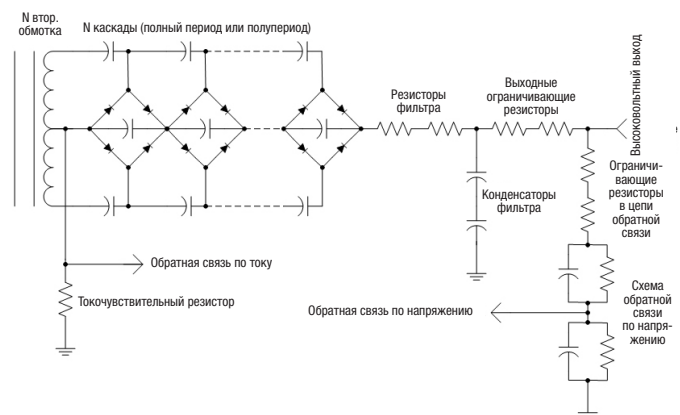


Рис. 2. Типичный высоковольтный выходной каскад

E. Цепи управления — это связующий элемент, благодаря которому все силовые каскады работают согласованно. Сложность цепи может ограничиваться одной аналоговой микросхемой, доходить до использования большого количества микросхем и даже микропроцессора, который осуществляет управление и контроль всех аспектов высоковольтного напряжения. При этом основное требование, которому должна удовлетворять любая цепь управления, состоит в точном регулировании выходного напряжения и тока в соответствии с нагрузкой, входной мощностью и сигналом управления. Лучше всего это достигается с помощью управления через контур обратной связи. На рис. 3 проиллюстрировано использование сигналов обратной связи для стабилизации выходного сигнала источника питания. Обычная стабилизация напряжения и тока может осуществляться путем контроля выходного напряжения и тока соответственно. Затем контрольные значения сравниваются с нужным (опорным) выходным сигналом. Разница (погрешность) между сигналом обратной связи и опорным сигналом инициирует изменение в управляющем устройстве инвертора. Это приводит к изменению мощности, выдаваемой на выходные цепи.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

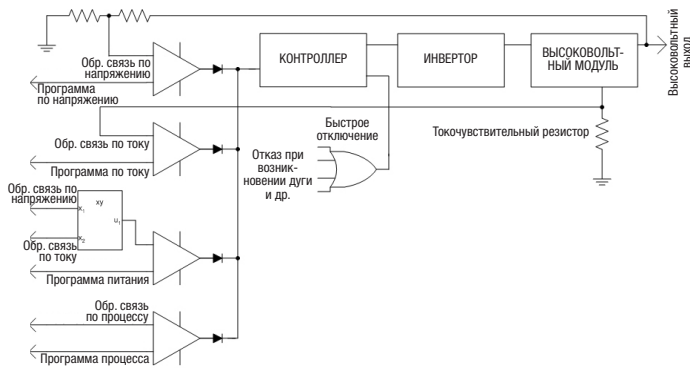


Рис. 3. Контуры управления источников питания

Кроме напряжения и тока могут точно стабилизироваться и другие параметры. Управление выходной мощностью легко осуществляется с помощью функции  $X \in Y = Z (V \in I = W)$ , и сравнения результата с нужным значением опорной выходной мощности. Действительно, любая переменная в законе Ома поддается регулированию (сопротивление, напряжение, ток и мощность). Кроме того, конечные параметры процесса могут регулироваться, если они определяются высоковольтным источником питания (т.е. выход рентгеновской трубки, скорость потока и т.д.).

ТОПОЛОГИИ ИНВЕРТОРА

Как уже упоминалось выше, в настоящее время существует большое разнообразие топологий инверторов. Однако выбор топологии инвертора для ВИП может определяться двумя факторами:

- Должна обеспечиваться развязка приведенной паразитной емкости.
- Должен обеспечиваться низкий уровень шума.

К счастью, имеется один общий подход, который удовлетворяет обоим требованиям. Это метод резонансного преобразования энергии. В резонансных топологиях используется параллельный резонансный контур для генерирования высокочастотного тока источника. Два способа реализации резонансного метода иллюстрируются на рис. 4 и 5. В обоих случаях осуществляется успешная развязка приведенной емкости с помощью последовательно включенной катушки индуктивности. В некоторых случаях приведенная емкость (CR) и последовательно включенная индуктивность составляют параллельный резонансный контур. Этот случай известен как топология последовательного резонанса/параллельной нагрузки. В других случаях конденсатор подключается последовательно с катушкой индуктивности, создавая при этом топологию последовательного резонанса/последовательной нагрузки.

Эти два подхода имеют явные различия. Если топология параллельной нагрузки больше напоминает источник напряжения, то топология с последовательной нагрузкой напоминает источник тока. У каждого варианта имеются свои преимущества, но, как правило, топология с последовательной нагрузкой

используется в областях применения с низким уровнем мощности, а топология с последовательной нагрузкой — в рабочих режимах с высоким уровнем мощности. Существует много причин для такой дифференциации в зависимости от уровня мощности. Но при этом имеется несколько ключевых факторов, которые определяют необходимость использования той или иной топологии в различных областях применения. Для понимания этого необходимо визуально представить приведенный конденсатор и то, что происходит с этим конденсатором во время короткого замыкания на выходе. Это имеет первостепенное значение, поскольку в состоянии короткого замыкания паразитная емкость уменьшается приведенной нагрузкой вторичной обмотки, в данном случае эта нагрузка равна нулю Ом. В областях применения с малой мощностью последовательно включенная катушка индуктивности имеет относительно высокое полное сопротивление (вследствие требований по мощности (VA)) и обеспечивает ограничение тока  $Vt/L$  для переключателей инвертора.

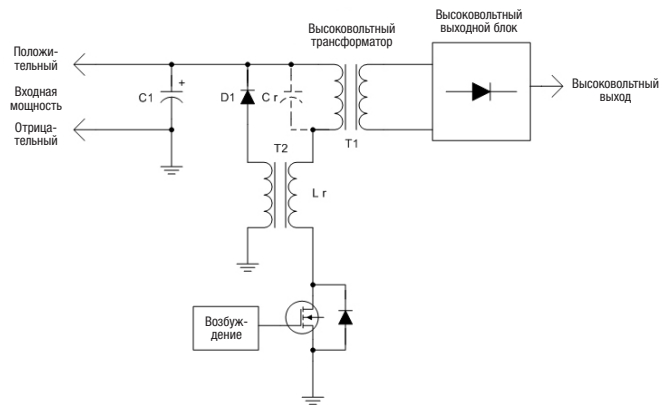


Рис. 4. Резонансный обратнoходовой/прямoходовой конвертор

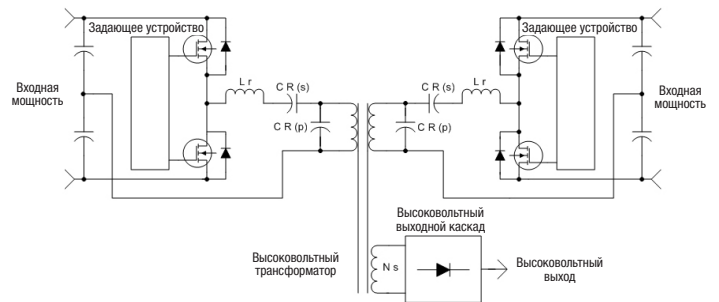


Рис. 5. Полуост/полный мост

В высокомошнвых устройствах последовательно включенный инвертор отличается существенно более низким полным сопротивлением и не обеспечивает собственного ограничения тока. Для этой цели используется схема с последовательно включенной нагрузкой. На рис. 6 можно видеть, что схема с последовательно включенной нагрузкой при работе на частоте, отличной от частоты параллельного резонансного контура, напоминает источник тока с собственным ограничением допустимой нагрузки по току и, таким образом, предохраняет переключающие устройства (рис. 6).

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

можно устранить ошибки, вызываемые аналоговыми микросхемами (операционные усилители, АЦП, ЦАП и т.д.), путем тщательного подбора приборов. [1]

В ВИП имеется один уникальный компонент, который является основным источником нестабильности — высоковольтный делитель в цепи обратной связи. Как видно на рис. 2, высоковольтный делитель в цепи обратной связи выполнен в виде схемы резистивного делителя. Эта схема разделяет выходное напряжение на достаточно низкие уровни, которые могут обрабатываться управляющими цепями (т.е. < 10 В пост. тока).

Проблема стабильности в этой сети вытекает из больших значений сопротивлений в цепи обратной связи. Типичные значения > 100 МОм. (Такие значения используются для снижения рассеивания мощности в цепи, а также уменьшения влияния изменений температуры вследствие собственного нагрева.) Высокое сопротивление и значения высокого напряжения требуют уникальной технологии специально для высоковольтных резисторов. Уникальные высоковольтные резисторы должны сочетаться с низкоомным сопротивлением для поддержания стабильности характеристик при изменении температуры, напряжения, влажности и времени.

Кроме того, высокое значение сопротивления в схеме обратной связи означает чувствительность к слаботочным помехам. Можно заметить, что токи порядка  $1 \times 10^{-9}$  А приведут к ошибкам > 100 м.д. Поэтому в конструкции сопротивления и резисторной схемы в цепи обратной связи необходимо продумать и учесть влияния тока коронного разряда. Кроме того, поскольку технология изготовления резисторов преимущественно базируется на керамическом сердечнике или подложке, следует учитывать также и пьезоэлектрические эффекты. Можно продемонстрировать, что вследствие вибрации во время работы высоковольтного источника питания происходит наложение сигнала, связанного с частотой колебаний, на выходной сигнал источника питания.

### ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ВЫХОДЫ

Во многих областях применения с использованием высокого напряжения для измерительного прибора требуются дополнительные источники питания. В ряде случаев эти вспомогательные источники питания работают вместе с высоковольтным источником питания. К таким примерам относятся: системы обеспечения энергии накала (нагреватель), которые встречаются в каждой рентгеновской трубке; источники управляющего напряжения на сетку смещения, фокусировки; необходимые низковольтные источники питания для других соответствующих схем управления.

Вполне вероятно, что конструктор измерительной аппаратуры может сделать выбор в пользу одного продавца, поставляющего все источники питания. Это очень распространено в сфере высокого напряжения, поскольку для работы с соответствующими высоковольтными схемами требуются специальные знания (т.е. требования по развязке элементов накала). Для конструктора высоковольтных источников питания это означает наличие специальных знаний фактически

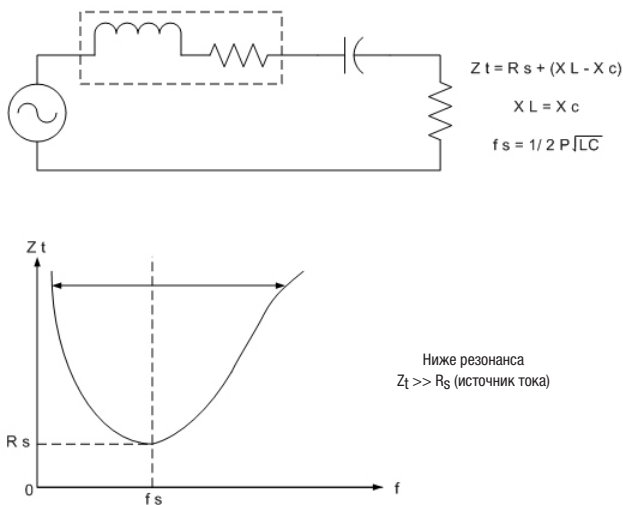


Рис. 6. Последовательный резонанс

Однако при этом существуют причины, по которым пользователь не может использовать схему с последовательно включенной нагрузкой. Можно заметить, что последовательно включенный конденсатор будет поддерживать напряжение, определяемое коэффициентом добротности (Q) резонансной схемы и приложенным напряжением. В любом случае это напряжение наблюдается на полной емкости цепи, последовательно включенном и паразитном конденсаторе. В маломощных областях применения отношение последовательно включенных емкостей (C) к параллельно включенным очень высоко (опять же вследствие вольтамперных характеристик (VA) колебательного контура). Таким образом, практически создается делитель напряжения, причем с большим напряжением на последовательно включенных емкостях. Это приводит к тому, что на трансформатор подается значительно меньшее напряжение, в результате чего высокое напряжение на вторичной обмотке ограничивается. При добавлении дополнительных витков создается дополнительная приведенная емкость, в результате этого становится невозможным генерирование дополнительного напряжения на вторичной обмотке.

### СТАБИЛЬНОСТЬ, РЕГУЛИРОВАНИЕ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

Как указано ранее, стабильность результатов имеет исключительное значение в аналитических процессах. ВИП должен быть источником со стабильными и воспроизводимыми характеристиками. Изменения выходного напряжения и тока обычно напрямую влияют на конечные результаты, и поэтому их следует воспринимать как источник погрешностей. Для программирования нужного выходного сигнала в ВИП используются источники опорного напряжения, которые служат причиной значительной погрешности. Ее можно устранить путем использования микросхем с очень устойчивым опорным напряжением. Типичными характеристиками для них являются показатели лучше 5 м.д./°С. Точно так же

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Использование и применение источника питания**

по всем аспектам технологии преобразования энергии, а не только по высоковольтным источникам питания. Например, достаточно часто встречаются системы обеспечения энергии накала, которые выдают более 100 А при 20 вольтах. Кроме того, такие выходные цепи, возможно, потребуют развязки на 100 000 В. В новой высоковольтной технологии используются даже специальные знания по управлению электродвигателем.

материалы и технология. Кроме того, особого внимания требуют аспекты безопасности при использовании высокого напряжения. Источники высокого напряжения могут таить в себе смертельную опасность! Неопытные пользователи высоковольтной техники должны быть ознакомлены с рисками, связанными с высоким напряжением. Общие рекомендации по технике безопасности приводятся в стандарте IEEE standard 510-1983 «Практические рекомендации по безопасности при испытаниях высоковольтного оборудования и оборудования высокой мощности». [4]

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В настоящем документе представлен краткий обзор специфических аспектов по высоковольтным источникам питания. ВИП обладают некоторыми уникальными особенностями, которые отличают их от обычных источников питания, имеющих в продаже. Конструктор, разработчик спецификаций и пользователь ВИП должны быть в курсе особенностей для достижения наилучших результатов. Технический прогресс в сфере преобразования мощности идет такими быстрыми темпами, что разработчику КИП трудно в полной мере реализовать новые достижения в конструкции ВИП. Поэтому ответственность должна распределяться между поставщиком ВИП и разработчиком КИП.

Как обсуждалось в настоящем издании, для разработки надежной конструкции высоковольтного прибора требуются передовые методы преобразования энергии, компоненты,

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- 1.) Precision Monolithics Inc. (PMI), «Analog I.C. Data Book, vol. 10.
- 2.) D. Chambers and C. Scapellati, «How to Specify Today's High Voltage Power Supplies», Electronic Products Magazine, March 1994.
- 3.) D. Chambers and C. Scapellati, «New High Frequency, High Voltage Power Supplies for Microwave Heating Applications», Proceedings of the 29th Microwave Power Symposium, July 1994.
- 4.) IEEE Standard 510-1983, IEEE Recommended Practices for Safety on High voltage and High Power.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

**Использование высоковольтных источников питания для создания электростатического поля**

Клифф Скейпелатти

**ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ВИП**

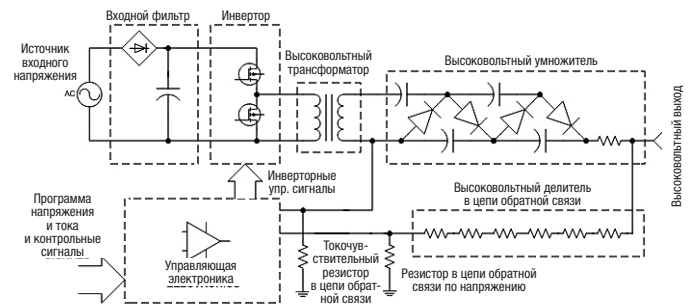
Источник входного напряжения может иметь широкий диапазон характеристик по напряжению. В достаточной мере распространены источники переменного тока с частотой от 50 до 400 Гц при напряжении от менее чем 24 до 480 В. Встречаются также источники постоянного тока с диапазоном напряжений от 5 до 300 В. Для пользователя важно понимать требования по входному напряжению, поскольку это влияет на конструкцию и использование системы в целом. Регулятивные органы, такие как Лаборатории UL (Underwriters Laboratory) в США, Канадская ассоциация по стандартизации, МЭК и др., играют активную роль в случаях подключения любых цепей к электроэнергетической системе. В дополнение к подаче питания на главные цепи источника питания источник входного напряжения также используется для подачи питания на собственные вспомогательные цепи управления и другие дополнительные устройства. Каскад входных фильтров обеспечивает предварительную обработку питания от источника входного напряжения.

**КРАТКИЙ ОБЗОР**

Высоковольтные источники питания — ключевые компоненты при использовании в областях с электростатическим полем. Для ученого, инженера, разработчика спецификаций и пользователя высоковольтных источников питания предлагается множество вариантов применения высоковольтных источников питания в промышленности и науке. Промышленные процессы, например, требуют расширенного мониторинга рабочих условий для максимального увеличения выпуска продукции, повышения качества и сокращения затрат. Последние достижения в технологии источников питания обеспечивают более высокий уровень мониторинга и управления технологическим процессом. Результаты научных экспериментов могут также зависеть от работы источников питания. В связи с этим в настоящей статье рассматриваются следующие характеристики источников питания: точность выходного сигнала, стабильность, пульсации и стабилизация параметров.

**ВВЕДЕНИЕ**

Для ученого, инженера, разработчика спецификаций и пользователя высоковольтных источников питания предлагается множество случаев применения высоковольтных источников питания в промышленности и науке. В частности, электростатическое поле может использоваться для достижения множества эффектов. В широком смысле электростатика — это изучение эффектов, создаваемых электрическими зарядами или полями. Электростатика может применяться для того, чтобы привести какой-либо материал в движение без физического контакта, для разделения материалов на элементарном уровне, для объединения материалов в однородную структуру и для других практических и научных целей. По определению, для того чтобы за счет электростатических эффектов выполнялась какая-то работа, требуется разность электрических потенциалов между двумя или более материалами. В большинстве случаев энергию, необходимую для создания разности потенциалов, получают от высоковольтного источника. Этим высоковольтным источником может быть высоковольтный источник питания (ВИП). Современные ВИП — это полупроводниковые высокочастотные приборы с такими характеристиками и возможностями управления, которые были недоступны несколько лет назад. За это время удалось добиться существенных улучшений по надежности, стабильности, управлению, миниатюризации, стоимости и безопасности. Зная об этих улучшениях, пользователь ВИП сможет максимально воспользоваться ими в областях с применением электростатического поля. В дополнение к этому необходимо иметь четкое представление о специфических требованиях к ВИП, поскольку они могут повлиять на оборудование, эксперименты, процессы или изделия, в которых используются.



**Рис. 1. Упрощенная блок-схема высоковольтного источника питания**

Это обработка обычно представляет собой выпрямление и фильтрацию напряжения от источников переменного тока, а также дополнительную фильтрацию от источников постоянного тока. В блоках также могут иметься схемы защиты от перегрузок, электромагнитных помех, схемы обеспечения электромагнитной совместимости и схемы контроля. Выход входного фильтра, как правило, представляет собой источник напряжения постоянного тока. Это напряжение постоянного тока служит источником энергии для инвертора. На каскаде инвертора происходит преобразование постоянного тока источника в высокочастотный сигнал переменного тока. В источниках питания существует много различных топологий инверторов. ВИП отличаются специфическими особенностями, которые могут определять наилучший подход к проектированию инвертора. Инвертор генерирует высокочастотный сигнал переменного тока, который повышается высоковольтным трансформатором. Генерирование высокочастотного тока обеспечивает высокоэффективную работу системы при уменьшенных размерах магнитных сердечников и накопительных конденсаторов, используемых для снижения уровня пульсаций. Проблема возникает тогда, когда трансформатор с высоким коэффициентом повышения подключается к высокочастотному инвертору. Высокий коэффициент повышения создает паразитную емкость на первичной

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

обмотке высоковольтного трансформатора. Это отражается как функция  $(N_{sec}:N_{pri})^2$ . Необходимо обеспечить развязку этой большой паразитной емкости на первичной обмотке трансформатора от переключателей инвертора. В противном случае на инверторе будут присутствовать anomalно высокие импульсные токи.

Другой параметр, который часто встречается в ВИП, — это широкий диапазон работы под нагрузкой. Вследствие присутствия высокого напряжения часто наблюдаются такие явления, как пробой изоляции. Показатели надежности инвертора и характеристики контура управления должны учитывать практически любую комбинацию обрыва в цепи, короткого замыкания и условий рабочей нагрузки. Все эти проблемы, в том числе надежность и стоимость, должны решаться в рамках в топологии инвертора ВИП.

Высокочастотный выходной сигнал с инвертора подается на первичную обмотку повышающего высоковольтного трансформатора. Для проектирования конструкции высоковольтного трансформатора требуются обширные теоретические и практические технические разработки. Полное понимание конструкции магнитных сердечников должно сочетаться с управлением материалами и технологическим процессом. Глубокие специальные знания необходимы и при использовании большого количества витков на вторичной обмотке, а также для управления высокими напряжениями вторичной обмотки. Из-за этих факторов геометрия сердечника, методы изоляции и методы намотки витков значительно отличаются от принятых при конструировании трансформаторов. Некоторые требующие внимания проблемы связаны с коэффициентом трансформации вторичной обмотки, характеристиками изоляции между слоями обмоток, коэффициентом рассеяния материала, геометрией обмоток из-за наличия паразитной емкости на вторичной обмотке и потока рассеяния, пропиткой слоев обмотки изоляционным лаком, уровнем эффекта коронирования и фактически с такими другими традиционными проблемами, как запас по тепловой нагрузке и общая стоимость.

Цепи высоковольтного умножителя напряжения обеспечивают выпрямление и умножение напряжения вторичной обмотки высоковольтного трансформатора. При подключении удвоителя напряжения для «подкачки зарядов» в этих цепях используются высоковольтные диоды и конденсаторы. Как и в случае с высоковольтным трансформатором, для разработки конструкции высоковольтного умножителя требуются специальные знания. В дополнение к выпрямлению и умножению высоковольтные цепи используются для фильтрации выходного напряжения, а также для контроля напряжения и тока цепи управления по обратной связи. Для защиты от разрядных токов накопительных конденсаторов в источнике питания можно искусственно увеличивать выходной импеданс.

Эти высоковольтные компоненты, как правило, изолируются от «земли» для предотвращения дугового пробоя. При этом используются самые разнообразные изоляционные материалы. Наиболее типичными являются: воздух, SF<sub>6</sub>, электроизоляционное масло, твердая заливка (клей-герметик, вулканизирующийся при комнатной температуре (RTV), эпоксидная смола и др.). Выбор изоляционных материалов и управление технологическим процессом являются, пожалуй, важнейшими аспектами конструирования надежных высоковольтных приборов.

Цепи управления координируют слаженную работу всех силовых каскадов. Степень сложности схемы может быть различной — от одной аналоговой микросхемы до большого количества микросхем и даже микропроцессора, который осуществляет управление и контролирует все аспекты высоковольтного питания. Однако базовое требование, которое должна выполнять любая цепь управления, состоит в точном регулировании выходного напряжения и тока в зависимости от требований по нагрузке, входному питанию и управлению. Лучше всего эта задача решается при помощи контура управления с обратной связью. На рис. 2 показано использование сигналов обратной связи для стабилизации выхода источника питания.

Обычная стабилизация напряжения и тока может осуществляться посредством мониторинга выходного напряжения и тока, соответственно. При этом происходит сравнение контрольных значений с нужным (опорным) сигналом. Разница (погрешность) между сигналом обратной связи и опорным сигналом вызовет изменение в управляющем устройстве инвертора. Это приведет к изменению мощности, подаваемой к выходным цепям.

Кроме напряжения и тока могут точно регулироваться и другие параметры. Управление выходной мощностью легко осуществляется с помощью функции  $X \in Y = Z (V \in I = W)$  и посредством сравнения результата с нужным опорным значением выходной мощности. Действительно, любая переменная в законе Ома поддается регулированию (сопротивление, напряжение, ток и мощность). Кроме того, конечные параметры процесса могут регулироваться, если они определяются высоковольтным источником питания (т. е. нанесение покрытия, объемный расход и т. д.).

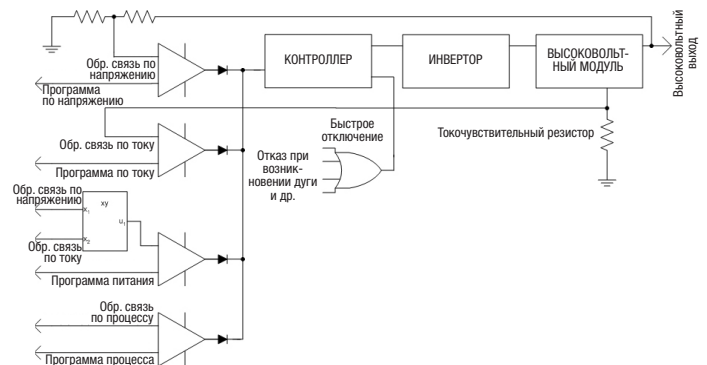


Рис. 2. Контур управления источников питания

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

Стабилизированный источник высокого напряжения и (или) постоянного тока — критически важный элемент в большинстве областей применения, в том числе в областях с использованием электростатического поля. Изменения выходного напряжения или тока могут напрямую повлиять на конечные результаты, и поэтому, должны рассматриваться как источник ошибок. Для программирования нужного выходного сигнала в ВИП используются источники опорного напряжения, которые являются причиной значительных погрешностей. Их можно устранить путем использования микросхем с очень устойчивым опорным напряжением. Типичные характеристики для них — показатели лучше 5 м.д./°С. Точно так же,



ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

путем тщательного подбора приборов, можно устранить ошибки, вызываемые аналоговыми микросхемами (операционные усилители, АЦП, ЦАП и т.д.).

В ВИП имеется один уникальный компонент, который представляет собой основной источник нестабильности. Это высоковольтный делитель в цепи обратной связи. Как видно на рис. 1, высоковольтный делитель в цепи обратной связи выполнен в виде схемы резистивного делителя. Эта схема будет делить выходное напряжение на достаточно низкие уровни, которые могут обрабатываться управляющими цепями. Проблема стабильности в такой схеме вызвана большими значениями сопротивлений в цепи обратной связи. Типичные значения > 100 МОм. (Такие значения используются для снижения рассеивания мощности в цепи, а также уменьшения влияния изменений температуры вследствие собственного нагрева). Высокое сопротивление и значения высокого напряжения требуют уникальной технологии, специально разработанной для высоковольтных резисторов. Уникальные высоковольтные резисторы должны использоваться совместно с низкоомным сопротивлением для поддержания стабильности характеристик при изменении температуры, напряжения, влажности и времени.

Кроме того, высокое значение сопротивления в схеме обратной связи означает чувствительность к слаботочным помехам. Можно заметить, что токи порядка  $1 \times 10^{-9}$  ампер приведут к ошибкам > 100 м.д. Поэтому в конструкции резистора и резисторной схемы в цепи обратной связи необходимо продумать и учесть влияния тока коронного разряда. Кроме того, поскольку технология изготовления резисторов преимущественно базируется на керамическом сердечнике или подложке, следует учитывать также и пьезоэлектрические эффекты. Можно продемонстрировать, что вследствие вибрации во время работы высоковольтного источника питания происходит наложение сигнала, связанного с частотой колебаний, на выходной сигнал источника питания.

**ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ**

Во многих областях применения с использованием высокого напряжения для КИП могут потребоваться дополнительные источники питания. Конструктор источников питания, как и конечный пользователь, должны быть знакомы с их применением в областях с электростатическим полем. Имея представление об области применения, конструктор источника питания сможет интегрировать те важные функции, которые будут полезными для конечного процесса.

Типичной функцией, которая может быть реализована в высоковольтном источнике питания, является контроль дуги (ARC Sense). На рис. 3 показана принципиальная схема обнаружения дуги. Как правило, датчик тока, например трансформатор тока или сопротивление, включается на «стороне низкого напряжения» выходных цепей высокого напряжения.

Обычно, токи дугового разряда рассчитываются по формуле:

$$I = (E/R) (1),$$

где I = ток дугового разряда в амперах,  
E = напряжение на высоковольтном конденсаторе,  
R = выходное ограничивающее сопротивление в омах.

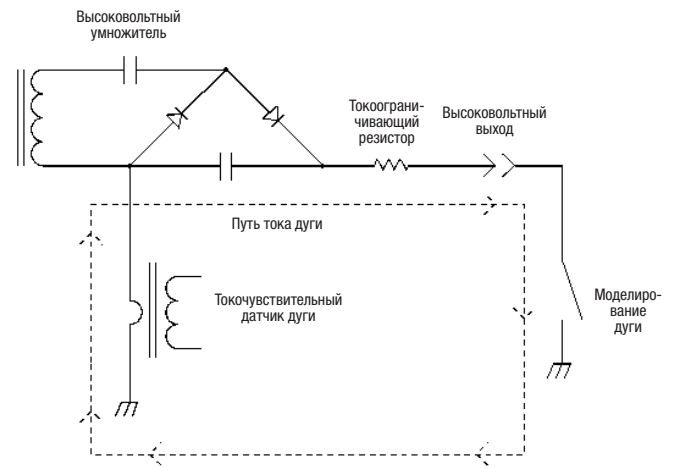


Рис. 3. Схема обнаружения дуги

Ток дугового разряда обычно намного больше номинального значения постоянного тока источника питания. Это происходит вследствие того, что ограничительный резистор имеет минимальное значение, и, вследствие этого, рассеяние мощности также минимально. После обнаружения дуги возможно выполнение нескольких функций. «Гашение дуги» (Arc Quench) — это термин, определяющий характеристику дуги, когда дуговой разряд прекращается при отключении подаваемого напряжения. На рис. 4 показана блок-схема реализации функции гашения дуги.

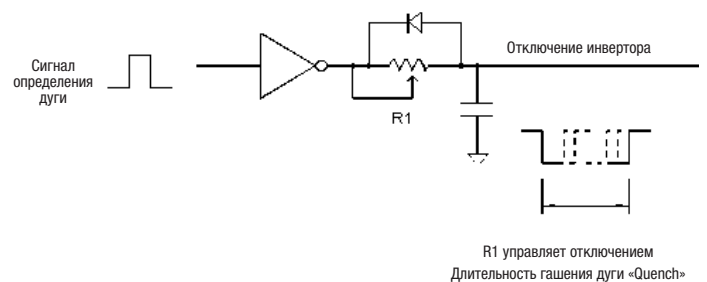


Рис. 4. Гашение дуги

Если отключение нежелательно при первом появлении дуги, может быть добавлен цифровой счетчик, как показано на рис. 5. Отключение или гашение произойдет после предварительно заданного количества обнаружений дуги. При этом необходимо использовать сброс по времени, который позволяет не накапливать явления низкочастотной дуги в счетчике. Пример: в спецификации может быть определено отключение дуги, если дуга возникала восемь раз за одну минуту.

Полезно использовать схемы обнаружения дуги для максимального увеличения приложенного напряжения до уровня, лишь незначительно ниже напряжения возникновения дуги. Реализовать такую возможность просто. После обнаружения дуги напряжение понижается до ее исчезновения. Напряжение может увеличиваться медленно в автоматическом режиме (рис. 6).

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

возможность — стабилизация тока с помощью электроники, используя регулирование тока с обратной связью, как показано на рис. 2.

В областях применения с несколькими источниками тока может быть практически неудобным иметь несколько источников питания. В этом случае для обеспечения нескольких источников тока можно использовать несколько сопротивлений. Обычно такой метод применяется там, где требуется обработка больших площадей с использованием электростатического поля. На рис. 8 показана такая схема.

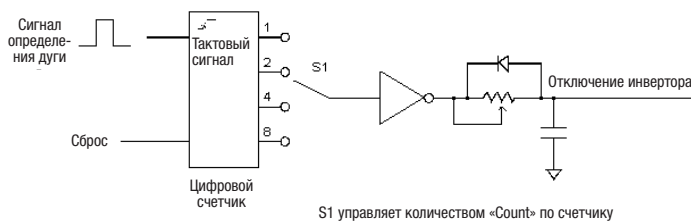


Рис. 5. Подсчет явлений дуги

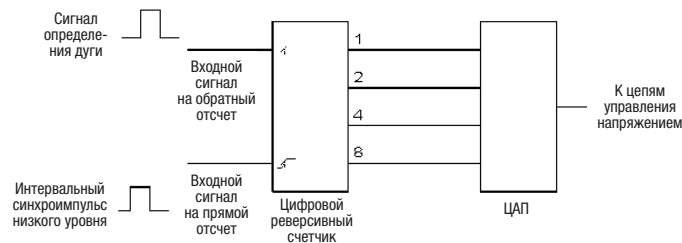


Рис. 6. Схема автоматического снижения напряжения

Еще одна особенность высоковольтных источников питания — это наличие высокоточной схемы контроля величины тока. Для общего применения эта характеристика контроля тока может быть точной только в диапазоне миллиампер или микроампер. Однако в некоторых областях с использованием электростатического поля может потребоваться точность в диапазоне фемтоампер. Такая точность может быть обеспечена высоковольтными схемами контроля. Однако пользователь источника питания должен указать это требование до заказа.

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Во многих областях с использованием электростатического поля желательно получить постоянный ток, созданный коронным разрядом. Эта задача может быть решена несколькими уникальными способами. Источник питания постоянной силы тока может быть определен в широком смысле как источник, у которого полное сопротивление намного больше импеданса нагрузки, на которую подается питание. Схематично это представлено на рис. 7:

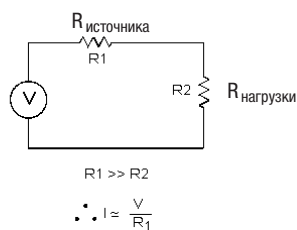


Рис. 7. Практический источник тока

Фактически, по мере изменения полного сопротивления R2, на ток оказывается пренебрежимо малое влияние через R1. Поэтому через R1 и R2 течет постоянный ток. В областях применения с одним источником питания существует две возможности. Первая заключается в том, чтобы использовать внешний резистор для стабилизации тока. Вторая

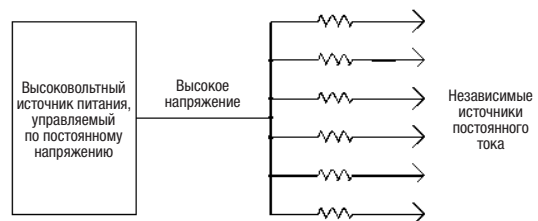


Рис. 8. Несколько простых источников тока

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлена полезная информация для областей применения с электростатическим полем, в которых используются высоковольтные источники питания. ВИП обладают некоторыми уникальными особенностями, которые отличают их от обычных источников питания. Конструктор высоковольтных источников питания может оказаться в состоянии предложить ключевое решение для пользователя электростатических устройств. Высоковольтные источники питания предлагают важные функции управления. Помимо этого, необходимо уделять особое внимание вопросам безопасности при использовании высокого напряжения. Источники высокого напряжения могут таить в себе смертельную опасность! Неопытные пользователи высоковольтной техники должны быть ознакомлены с рисками, связанными с высоким напряжением. Общие принципы обеспечения безопасности приводятся в стандарте IEEE Standard 510-1983 «Практические рекомендации по безопасности при испытаниях высоковольтного оборудования и оборудования большой мощности». [4]

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.) C. Scapellati, "High Voltage Power Supplies for Analytical Instrumentation", Pittsburgh Conference, March 1995.
- 2.) D. Chambers and C. Scapellati, "How to Specify Today's High Voltage Power Supplies", Electronic Products Magazine, March 1994.
- 3.) D. Chambers and C. Scapellati, "New High Frequency, High Voltage Power Supplies for Microwave Heating Applications", Proceedings of the 29th Microwave Power Symposium, July 1994.
- 4.) IEEE Standard 510-1983, IEEE Recommended Practices for Safety In High Voltage and High Power Testing.

## Процесс разработки продукции для высоковольтных источников питания

Автор Клифф Скапеллати (Cliff Scapellati)

### КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ

Применения, требующие высоковольтные источники питания, растут хорошими темпами. В большинстве случаев высоковольтный источник питания должен быть разработан на заказ для определенного применения. Кроме того, рыночное давление в направлении уменьшения стоимости, увеличения мощности и повышения надежности требуют существенного исследования новых инновационных подходов.

Целью статьи является знакомство пользователей и заказчиков высоковольтных источников питания с процессом разработки в целях улучшения будущих программ развития.

Типичная продолжительность разработки для этих новых конструкций будет меньше одного года. В работе рассмотрен анализ этого процесса разработки. Процесс разработки должен охватывать: технические условия для изделия, назначение материальных и трудовых затрат, вопросы поставщиков и составных частей, анализ управления процессом, техническую проработку электрической/механической части и материалов, определение экспериментов, нагрузочные испытания, анализ безопасности, нормативные требования, создание и испытания прототипа, производственную документацию, контрольные точки проверки конструкции, и запуск в производство. Эти требования представлены физическими требованиями сфер применения и включают изоляцию высоковольтных систем, концепции конструктивных решений, испытания высоким напряжением, и конструкцию электронной части.

### ВВЕДЕНИЕ

Основанием для процесса разработки любого определенного изделия является возможность применить общие методы управления проектом. Инструменты управления проектом позволяют осуществлять успешное выполнение процесса. В общем, управление проектом координирует все ресурсы, требуемые для определения, планирования, выполнения, и оценивания проекта. Решение для принятия проекта может представлять определенные сложности. Однако, как только принято решение двигаться вперед по проекту, решение о применении методов управления проектом становится легким. По определению, проект означает, что сделана ставка на важные стратегические цели. Без правильного управления проектом цели не будут достигнуты.

Был определен и с высокой нормой успеха выполнен тщательный и подробный процесс в области разработки продукции с высоковольтными источниками питания. Разработаны процедуры для многих участков работы, экспериментирования, и испытаний специально для высоковольтной области.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КОНЦЕПТУАЛИЗАЦИЯ ИЗДЕЛИЯ

Обычно технические условия для высоковольтных источников питания устанавливаются системным проектировщиком следующего уровня. Редко маркетинговые технические условия являются основанием для определения изделия. Это значительно упрощает задачу окончательной проработки технических условий и утверждения начала проекта.

Систему следующего уровня можно определить как оборудование, в котором будет применен высоковольтный источник питания. Необходимо тесное сотрудничество команды системного проектирования с инженерами-разработчиками высоковольтного источника питания. В большинстве случаев технические обсуждения в течение нескольких дней приводят к выработке достаточных технических условий. Другие вопросы контракта могут вызывать задержку начала проектирования и могут требовать соответствующего внимания.

#### А. Концептуализация изделия:

Параллельно с технической проработкой и обсуждением технических условий формируется концептуальный подход. Изначально лучшим методом для сокращения рисков будет положиться на технологии существующих платформ. Анализ снижения рисков на этой фазе может дать проекту существенное сокращение затрат и времени в дальнейшем. Анализ рисков следует рассматривать с точки зрения преимуществ для обеих сторон. Ни одна из сторон не получит преимуществ за счет негарантированных и не являющихся необходимыми рисков. Однако требуется огромная дисциплина для преодоления соблазна концептуализации подхода, который может казаться новым и захватывающим. Многие технические специалисты не выдерживают этого испытания и платят соответствующую цену в виде задержек программ, вопросов надежности и превышения затрат.

Конечно же, основное исследование и разработку в жертву приносить нельзя, и их следует осуществлять отдельно от усилий, направленных на развитие.

Необходимость выполнения новых НИОКР на этапе процесса разработки изделия может существенно повредить процессу.

#### В. Итеративное проектирование:

Как отмечено выше, использование существующей платформы для изделия — лучший способ минимизировать риски. Однако даже с изделиями на существующей платформе потребуются некоторые новые концепции проектирования. Обычно это новые конструктивные решения механической компоновки, новые схемы интерфейсов, требования вспомогательной мощности (для питания накала или сетки) и т.п. Изначально эти новые идеи будут отправной точкой для подробной проработки. Однако если их постоянно не обновлять, эти «идеи изначального подхода» будут неизменными и не дадут наилучшего решения.

Как верно сказано: самая первая идея не обязательно самая лучшая. Она быстро устареет, сразу же, как только концептуальная разработка начнет принимать форму.

Методика, которую лучше всего использовать на этих ранних этапах — итеративный процесс проектирования. Посредством него начальные идеи постоянно обновляются, так как подробности обретают форму. При внешнем рассмотрении итерации могут казаться причиной задержек проектирования. Но в конечном итоге этот процесс приводит к более прочному основанию, обеспечивающему стабильность проекта на его заключительных этапах.

## ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЕКТА

Ясное определение рамок проекта столь же важно как концептуализация и проектирование изделия. Без ясного понимания «Кто, что, где, когда, почему, и как» проект может сойти с курса. Это можно в основном рассматривать с деловой стороны управления проектом. «Деловая» часть часто воспринимается некоторыми техническими специалистами как табуированный объект. Это совершенно понятно и должно быть включено в процесс принятия решений, используемый технической командой разработчиков. Здесь руководитель проекта должен иметь полное понимание стратегических бизнес-целей, связанных с успехом проекта. Руководитель проекта должен беспрестанно соизмерять деловые вопросы с техническими вопросами. Придется делать трудные выводы и принимать решения. Здесь определенные рамки программы помогут искать направления для принятия решений. Во всех случаях руководитель проекта должен пытаться информировать всех членов команды о бизнес-стратегии и рамках. Во многих случаях это позволит «принимать в долю» при вынесении решений или необходимости стратегического изменения курса. В некоторых случаях члены команды не будут иметь отношения к бизнес-стратегии и рамкам проекта. Это естественно и этим нужно управлять.

### А. Декомпозиция работ:

Понятие декомпозиции работ (ДР) обычно используется в классическом управлении проектами. ДР ясно определяет, в виде иерархии, требующие выполнения работы. В больших проектах подробности работ могут не найти своего отражения в формальном анализе ДР. Однако в небольших и средних проектах (например разработка высоковольтного источника питания) все подробности ДР нужно сделать видимыми. В больших проектах задачи ДР могут предназначаться группам или отделам, но в небольших и средних проектах следует всегда ясно назначать задачи исполнителю. Примеры этого типа подробностей: проектирование печатной платы для монтажа, проектирование магнитных цепей, экспериментальные определения и анализ, разработка спецификаций и т.п.

Далее показан пример ДР для печатной монтажной платы:

#### 1.0 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ МОНТАЖА

##### 1.1 Проектирование электрической части

###### 1.1.1 Электронное оборудование управления

###### 1.1.2 Средства диагностики

###### 1.1.3 Интерфейс

##### 1.2 Проектирование компоновки печатной платы

###### 1.2.1 Исследование в механической области

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

#### 1.2.2 Создание обозначений компонентов

#### 1.2.3 Трассировка и т.п.

На основании схемы ДР исполнитель или группа смогут теперь выполнять назначенную задачу, организуя требуемые для ее выполнения время и ресурсы.

### В. Распределение ресурсов:

Это необходимость назначения квалифицированных ресурсов для процесса разработки. Без исключений, количество и возможности членов команды определяют успех или неудачу проекта. Недостаточные ресурсы, или неготовность назначенных ресурсов приводит к задержке выполнения задач ДР. Даже если имеются достаточные ресурсы, ограничений возможностей отдельных исполнителей может задерживать выполнение задания. Назначая ресурсы для задач, важно определять цели проекта и задания. Они должны быть определены отдельно, ясно назначены ответственному исполнителю вместе с графиком выполнения. Другие влияющие факторы также могут воздействовать на ресурсы и вызывать задержки. Сторонние услуги, например консультации, субподряд или поставки могут серьезно затруднять прогресс в случае их неприемлемого выполнения. Если исполнители ответственны за несколько изделий или проектов, будут происходить неожиданные конфликты. Например, для изделия, прошедшего этапы разработки, внезапно требуются переработка или изменения. Этот вид неожиданной нагрузки для ресурсов типичен, но очень сложен для управления. При любой возможности следует использовать специалистов технической поддержки для обеспечения мер, не связанных с деятельностью по разработке.

### С. Графики проекта:

График проекта является другим важным инструментом управления проектом. Можно использовать ряд систем планирования проектов (1). В этом определенном процессе главный график проекта выполнен с использованием столбчатых диаграмм планирования проекта или диаграмм Ганта. Здесь задачи указаны в определенном порядке вместе с последовательной временной осью. Порядок следования задач может отражать ДР. Это помогает сохранять ДР и график в одной базе данных для более легкого управления. Еще раз, как и в случае с ДР, важно включать столько подробных задач, сколько целесообразно в графике этого проекта. Иначе эти задачи могут быть легко забыты. Примерами этих видов задач являются:

- Контрольные точки проверки конструкции и подготовка
- Прослеживание материалов и затрат
- Заказ материалов
- Документация процесса
- Проектирование конструктивного оформления для поставки
- Оборудование и методика испытаний
- Испытание защиты от воздействия окружающей среды
- Инструментальное оснащение производства
- Выпуск производственных чертежей
- И т.д.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Использование и применение источника питания**

- Технологичность
- Технические и стоимостные риски
- Испытания и техническое обслуживание
- Составление графика
- Оценка затрат на материалы и оплату труда

Все они рассматриваются и проверяются. Неизбежно появление новых задач по мере возникновения вопросов. Эти задачи отслеживаются в виде «мер» и назначаются исполнителю вместе с датой завершения. Все вопросы относительно мер рассматриваются на еженедельных совещаниях. Это помогает обеспечить оперативное внимание к этим задачам.

**В. Критическая проверка конструкции:**

Критическая проверка конструкции имеет место в середине проекта. Здесь происходит проверка подробных данных конструкции, экспериментальных данных, и проверка технического обеспечения макета. Многие темы, охватываемые в концептуальной проверке конструкции, будут рассматриваться повторно. Однако на этом этапе уровень подробной проработки должен быть таким, чтобы можно было ясно определить и идентифицировать издержки. Эти подробности можно описать как:

- Предварительные данные (для технических условий) рабочих характеристик
- Рабочие чертежи механической конструкции
- Электрические схемы
- Данные о теплоотводе и КПД
- Технические условия для программного обеспечения
- План испытаний защиты от воздействия окружающей среды
- Методика приемочных испытаний
- План испытаний ЭМС
- Демонстрация макета
- Фактические затраты материалов и расходы на проект

Снова назначаются меры. Рассматриваются предыдущие меры от предыдущих проверок конструкции и успешно решаются все вопросы.

**С. Заключительная проверка конструкции:**

На этой стадии проекта проверяется верификация проекта. Предъявляется разработанная методика испытаний, и рассматриваются любые открытые вопросы относительно характеристик или надежности. Как и раньше, обсуждаются вопросы из предыдущих проверок конструкции, и предоставляется надежное доказательство их решения.

**СТАНДАРТЫ ISO9000**

Описанный здесь процесс проектирования высоковольтного источника питания действует согласно системе качества ISO9000. В особенности требовалось создание процедур процесса для разделов 4.3 Проверка договора, 4.4 Управление проектированием и 4.5 Управление документацией и данными согласно международному стандарту ISO9001.

Создавая график проекта, в отношении сроков и назначенных задач важно располагать пониманием и подтверждением со стороны проектной команды. Если оценки продолжительности работ неправдоподобны, члены команды могут отказаться от владения процессами, и задача не будет выполнена. В добавление к членам команды следует информировать старшее руководство, и индивидуальные проекты должны быть включены в основной долгосрочный график работы отдела.

**УКАЗАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕРКИ КОНСТРУКЦИИ**

Форум проверки конструкции является критической частью проекта. Во время этих форумов выполняется проверка разработки с целью информирования заинтересованных сторон, не связанных с проектной командой непосредственно, о прогрессе проекта. Важно, чтобы эти проверки конструкции укрепляли и улучшали прогресс команды. Проверка конструкции никоим образом не может заменять ежедневное и еженедельное управление проектом. По своей сути, проверки конструкции имеют место только на критических этапах проекта. Если важные решения задерживать до контрольных точек проверки конструкции, возможны задержки проекта. Успешной методикой, используемой для краткосрочной проверки, являются еженедельные совещания команды. На этом форуме члены критической команды встречаются еженедельно и быстро решают возникающие вопросы. Эта группа обычно состоит из 8–12 человек, в том числе: руководитель проекта, инженеры-электрики, инженеры-механики, персонал лаборатории, контроля качества, коммерческий/маркетинговый и представители производственных отделов.

В процессе, используемом для разработки высоковольтного источника питания, необходимо использовать определенные требования для каждой проверки конструкции и контрольный список, чтобы гарантировать выполнение этих требований. Важные контрольные точки проверки конструкции определены и очень полезно, когда конечный пользователь оборудования присутствует при проверке конструкции. Эти контрольные точки имеют место на следующих этапах проекта:

**А. Концептуальная проверка конструкции:**

Концептуальная проверка конструкции происходит на ранней стадии проекта. На этой стадии замысел изделия рассматривается вместе с требованиями технических условий.

Некоторые определенные требования концептуальной проверки проекта:

- Совместимость конструкции с техническими условиями
- Концепции проектирования механической части
- Эскизные чертежи механической части
- Концепции проектирования электрической части
- Концепции теплоотвода
- Архитектура аппаратных средств / программного обеспечения
- Надежность и защита от воздействия окружающей среды (ESS)

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

Возможно продемонстрировать, что все части процесса разработки учитывают стандарты ISO. Проверка договора устанавливается на раннем этапе разработки технических условий и концептуализации проекта. Так как высоковольтный источник питания определен в качестве разрабатываемого согласно требованиям заказчика, заказчик принимает участие во всех аспектах начальной проверки. Изменения в течение срока службы изделия затрагивают заказчика, и поставщик управляет изменениями.

Следование управлению проектированием будет происходить естественно, если выполняются и должным образом документируются планирование проекта, проверка конструкции и распределение ресурсов.

Верификация и валидация конструкции требуют специального внимания. Многие вопросы, рассматриваемые во время проверки конструкции, будут документированы при верификации конструкции. Валидацию конструкции можно выполнять на месте, чтобы восстановить рабочие условия конечного пользователя, или получая подробные отчеты и протоколы испытаний от конечного пользователя. Хотя управление документацией и данными, возможно, непосредственно не требуется во время проекта разработки изделия, в это время создаются важные критические документы, которыми требуется управлять на ранней стадии проекта. Это позволит минимизировать неопределенность, когда изделие будет передано в производство.

## Следующее поколение оборудования подачи энергии (ОПЭ)

Пол Треглиа и Клайв Макнамара

### Общие сведения

Подводная кабельная система питается от оборудования подачи энергии (ОПЭ). ОПЭ подает постоянный ток на оптоволоконные повторители. В настоящее время существуют многолетние устоявшиеся требования к ОПЭ — стабильный выход (постоянный ток), высокая надежность (даже при землетрясении), безопасность и высокий уровень контроля и диагностики. В годы «восстановления» после 2002 года были добавлены другие требования — невысокая стоимость и малая сложность (меньший размер). В 2006 году на объекты начало поставляться первое разработанное компанией Spellman комплектное ОПЭ Single-Bay (Gen3).

### Потребность в большем

Система Gen3 рассчитана на 5 кВ, что ограничивает длину кабеля, который она может питать. Она не подходит для длинных кабельных трасс (> 2000 км). Растущие потребности в длинных кабельных трассах повышают требования к напряжению, а развитие конструкции повторителя приводит к увеличению потребности в токе. Более высокий ток для повторителей в свою очередь увеличивает потребность в напряжении ОПЭ еще больше, потому что это увеличивает потери кабеля (падение напряжения). На основе этих потребностей было разработано следующее поколение ОПЭ (Gen4) для обеспечения более высокого напряжения, более высокого тока и более высокой мощности для систем дальней связи.

### ОПЭ Gen4



Рис. 1. ОПЭ Gen4

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

ОПЭ Gen4 рассчитано на 15 кВ, 1,5 А. Это существенное увеличение напряжения (в три раза), тока (в полтора раза) и мощности (в четыре с половиной раза) по сравнению с Gen3. Конструкция ОПЭ Gen4 состоит из трех шкафов. Три шкафа являются (слева направо):

#### Часть отсека выхода/контроля ОПЭ

Содержит локальный блок управления (ЛБУ) и сетевой коммутатор (СК), которые предназначены для включения Ethernet-связи между всеми внутренними и внешними элементами ОПЭ в систему управления сетью для удаленной диагностики и мониторинга. Также в этом шкафу располагаются сложные функции ОПЭ по управлению выходом, защиты, конфигурация и настройки полярности.

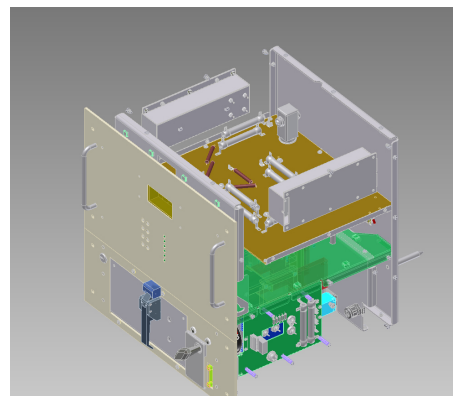


Рис. 2. Блок контроля выхода (БКВ). Часть отсека выхода/контроля ОПЭ

#### Отсек преобразователей —

содержит 6 идентичных высоковольтных силовых преобразователей в конфигурации n+1. Для полного напряжения/тока необходимы только 5 преобразователей. Если полная нагрузка не требуется, для удовлетворения требований используется меньше преобразователей.

#### Отсек тестовой нагрузки

содержит сочетание из 1 модуля активной тестовой нагрузки (АТН) и 4 модулей пассивной тестовой нагрузки (ПТН).

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

АТН представляет собой переменную электронную нагрузку, использующую массив МОП- транзисторов, работающих в своей активной области. ПТН состоит из фиксированных резисторов в сочетании с реле высокого напряжения. АТН обеспечивает точную настройку, а ПТН обеспечивает грубую настройку. Эти модули совместно обеспечивают переменную нагрузку, способную непрерывно рассеивать 22,5 кВт.

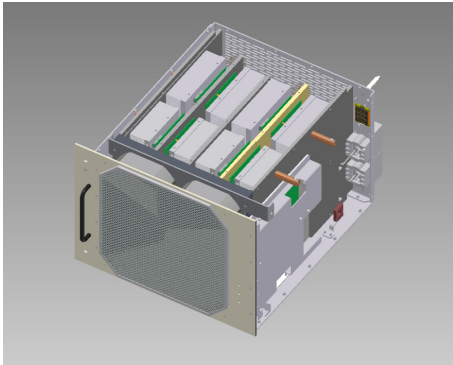


Рис. 3. Пассивная тестовая нагрузка (ПТН)

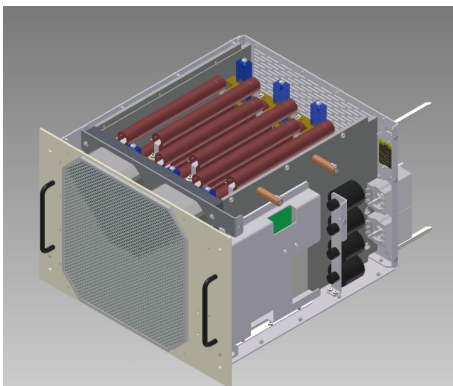


Рис. 4. Активная тестовая нагрузка (АТН)

Подобно ОПЭ Gen3 большая часть сменных блоков (СБ) в ОПЭ оснащены разъемами с заглушками, что позволяет осуществлять быструю замену в случае отказа.

**Дополнительные возможности**

В процессе проектирования часто приходится учитывать дополнительные возможности, основанные на запросах пользователей предыдущих версий. Ниже приведены некоторые возможности, добавленные во время разработки ОПЭ Gen4. Эти функции недоступны в ОПЭ Gen3:

**Сбор данных**

ОПЭ Gen4 постоянно (каждые 10 мс) записывает критические параметры: напряжение ОПЭ, ток ОПЭ, напряжение земли океана, ток утечки на землю станции. ЛБУ, встроенный в ОПЭ, имеет возможность отображать эти данные локально или они могут быть отправлены далее (наружу) в систему управления сетью. Внутренняя память в ОПЭ позволяет сохранять очередь данных за прилб. 1 неделю.

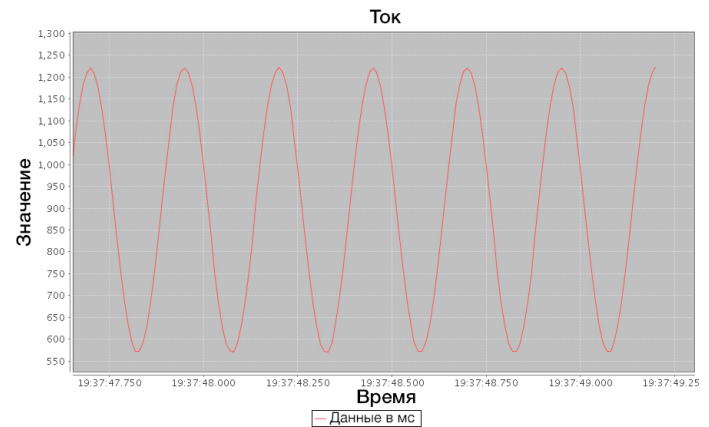


Рис. 5. Графический интерфейс сбора данных ЛБУ

**Резервированные разъемы для земли океана**

Все больше и больше заказчиков запрашивают этот вариант исполнения. Эта функция обеспечивает резервирование критического соединения с землей океана (ЗО). Ток контролируется на обоих соединениях ЗО. В норме эти токи должны быть равны. Если они не равны, это скорее всего указывает на проблему соединения на одном из них, что предупреждает пользователя о необходимости обслуживания, до того как ситуация повлияет на работу ОПЭ.

**Настройка для нескольких диапазонов напряжений —**

ОПЭ Gen4 имеет максимальное напряжение 15 кВ, но его можно настроить (на фабрике) для более низкого напряжения, сохраняя при этом тот же номинальный ток (1,5 А). Помимо 15 кВ возможны варианты исполнения на 6 кВ, 9 кВ, 12 кВ. Это достигается за счет установки меньшего количества модулей преобразователей и пассивной тестовой нагрузки (ПТН) (на 1 преобразователь и 1 ПТН меньше для каждых 3 кВ). Система всегда состоит из 3 шкафов. Диапазон 6-15 кВ перенимает эстафету там, где заканчиваются возможности ОПЭ Gen3 (на 5 кВ).

**Сравнение ОПЭ Gen3 и ОПЭ Gen4**

	Gen3	Gen4
Кол-во шкафов	1	3
Резервирование преобразователя	2n	n+1
Напряжение	5 кВ	15 кВ
Ток	1,0 А	1,5А
Мощность	5 кВт	22,5 кВт
Сбор данных	Нет	Да

**ОПЭ Gen3**

ОПЭ Gen3 был разработан для использования с более короткими кабельными трассами по более низкой цене, при этом обеспечивая высокий уровень безопасности, диагностики, надежности и доступности. На сегодняшний день в эксплуатации находятся более 65 систем ОПЭ Gen3, обеспечивая надежное питание для оптоволоконных повторителей по всему миру.



**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Использование и применение источника питания****ОПЭ для кабелепрокладочных судов**

В дополнение к достижениям в конструкции наземного ОПЭ также были достигнуты некоторые успехи в создании ОПЭ для судов. При развертывании нового или отремонтированного кабеля прокладка кабелей с судов является дорогостоящим и трудоемким процессом, и поэтому инженерам кабельных сетей необходимо знать, что прокладываемый кабель работает правильно. Питание может подаваться с наземного ОПЭ на береговой станции, но это представляет большую опасность для ремонтного экипажа на судне, поскольку контроль за включением или выключением высокого напряжения не находится на судне, где инженеры кабельных сетей и рабочие могут быть подвергнуты воздействию высокого напряжения развернутого кабеля.

Во время этих операций для питания кабеля на судне используется бортовое ОПЭ, сохраняя при этом контроль за высоким напряжением на судне для обеспечения безопасности экипажа. В связи с тем, что кабелепрокладочные суда могут работать со многими разными кабелями, бортовое ОПЭ судна обычно рассчитано на ок. 12 кВ при ок. 2А.

ОПЭ Gen3 рассчитан на 5 кВ и 1 А. Этого достаточно для прокладки +1000 км кабеля, и часто используется для питания кабелей, проложенных между несколькими береговыми площадками на берегах соседних стран.

**Рис. 6. ОПЭ Gen3**

Начиная сверху, имеется следующее:

**Тестовая нагрузка**

Переменная электронная нагрузка, способная непрерывно рассеивать мощность в 5 кВт.

**Преобразователи (2)**

Конфигурация 2n, в которой каждый преобразователь может работать при 5 кВ, 1 А в случае, если другой неисправен. Во время нормальной работы преобразователи подключены последовательно и делят общее напряжение ОПЭ.

**Локальный блок управления (ЛБУ)**

ПК, клавиатура, монитор, мышь, коммутатор Ethernet.

**Модуль выхода ОПЭ**

Выход преобразователей питает подводный кабель с использованием сложных устройств контроля и защиты. Кабельный доступ и оконцевание (замыкание или размыкание) также обеспечиваются в точке выхода ОПЭ. Эта точка доступа может быть использована для подключения других устройств тестирования кабелей к кабельной трассе. В виду опасности наличия высокого напряжения в этой точке, а также во всем ОПЭ должны быть реализованы сложные функции безопасности.

**Рис. 7. Бортовой ОПЭ судна**

Эти судовые системы ОПЭ функционально очень схожи со стандартным наземным ОПЭ, только с уменьшенной функциональностью и требованиями (и с существенно более низкой стоимостью). Схожесть заключается в управлении включением и выключением питания кабеля. Кабель представляет собой огромный индуктор и конденсатор, поэтому регулирование тока должно быть очень медленным, чтобы не вызывать каких-либо переходных процессов или колебаний, которые могли бы повредить повторители.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

**Использование и применение источника питания**

**Заключение**

В индустрии ОПЭ появляются все новые решения, уже доказавшие, что они соответствуют и даже превосходят требования и ожидания заказчиков. С системами ОПЭ Gen3 и ОПЭ Gen4 удовлетворяется большинство требований к наземному оборудованию для питания подводных оптоволоконных сетей по всему миру. Дальнейшее развитие отрасли видится в сокращении размеров систем с сохранением или увеличением характеристик по напряжению, а также разработка недорогих устройств с низким напряжением (например, для распределительного оборудования).

Пол Треглия — директор по разработке продукции, компания Spellman High Voltage Electronics Corporation

Клайв Макнамара — региональный менеджер по продажам в Великобритании, компания Spellman High Voltage Electronics, Ltd.



**Рис. 8. Рабочие готовятся к прокладке кабеля**

Фотография любезно предоставлена компанией Global Marine Systems, Ltd.

Бортовое ОПЭ судна оснащено новым терминалом управления системой (ТУС), который позволяет устанавливать параметры, а также безопасно управлять аварийными сигналами и скоростью линейного изменения для включения и выключения питания. ТУС заменяет первоначальный блок управления системой (БУС), в данное время устаревший.



**Рис. 9. Бортовой ТУС судна**

Бортовое ОПЭ судна может работать от переменного тока, подаваемого от судовых генераторов, и, как правило, может использовать больше типовых высоковольтных источников питания. (Нет необходимости в аккумуляторах и отсутствие сейсмических событий в море). Но для судового ОПЭ надежность по-прежнему имеет первостепенное значение, поскольку отказ ОПЭ в море прервет развертывание кабеля до прибытия помощи.

## Технология высоковольтных источников питания для использования в электроснабжении

Пол Треглиа и Клайв Макнамара

### Общие сведения

Всю совокупность технологий, так или иначе относящихся к электроснабжению, можно назвать технологиями преобразования энергии. Технологии преобразования энергии предлагают нам множество типов источников питания и устройств для многообразия различных типов применения. Высоковольтные источники питания — это одна из многих узкоспециализированных ниш, существующих в этой широкой технологической среде. Оборудование подачи энергии (ОПЭ) — это еще более узкая специализация технологий высоковольтного преобразования энергии. Исторически так сложилось, по ряду причин, что ОПЭ разрабатывалось и производилось изготовителями подводного коммуникационного оборудования. Это было обусловлено критической важностью прикладных знаний, необходимых для разработки ОПЭ, и отсутствием этих знаний в более широких секторах технологии высоковольтных источников питания. Однако с быстрым развитием технологии преобразования энергии разработчику систем сложно выделять ресурсы, необходимые для поддержания современного уровня технологий.

### Привлечение подрядчиков, как ключ к развитию технологий ОПЭ

В начале 1990-х годов началась стратегия привлечения подрядчиков для «неосновных технологий». Многие крупные компании, изготавливающие сложные системы, передавали разработку компонентов подсистем сторонним компаниям, специализирующимся на применимой технологии. Эта стратегия в то время использовалась компанией AT&T (текущее название Тусо Telecommunications) для нового недорогого проекта ОПЭ. Благодаря партнерству с производителем, специализирующимся на производстве высоковольтных источников питания, в сочетании с прикладными знаниями AT&T, для требований к ОПЭ были реализованы уникальные решения. (На рис. 1 показана подсистема преобразователя, разработанная для AT&T в начале 90-х годов). На сегодняшний день подобный тип партнерства является самым перспективным для технологий ОПЭ. Основные преимущества заключаются в меньших размерах, более низкой цене, более низкой стоимости владения и более высокой надежности системы.



## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

#### Основы технологии высокого напряжения

**Начнем с предупреждения: потенциал высокого напряжения, используемый в любом ОПЭ, является смертельным! Только квалифицированные операторы и обслуживающий персонал должны использовать или иметь доступ к любому высоковольтному оборудованию.**



Рис. 1

Высоковольтный источник питания, используемый в ОПЭ, часто называют преобразователем. Это достаточно точное определение, потому что он преобразует одну форму постоянного тока (-48 В) в другую форму постоянного тока (постоянный ток высокого напряжения). В самом преобразователе есть несколько основных конструктивных блоков:

#### Обработка входной мощности

Обеспечивает фильтрацию входного питания и защиту цепей. В сфере телекоммуникаций часто используются аккумуляторные источники питания с двумя входами (BAT A и BAT B). Таким образом обеспечиваются резервные источники входного питания для каждого устройства.

#### Инвертор

В любом современном преобразователе есть инвертор. Инвертор «инвертирует» источник питания постоянного тока в высокочастотный источник переменного тока. Такое решение позволяет использовать компактные магнитные узлы с высокими характеристиками, такими как сверхнизкая выходная пульсация и быстрое регулирование выходной мощности. В инверторе используются высокоскоростные транзисторы для «переключения» постоянного тока в сигнал переменного тока. (Так как источники электропитания в телекоммуникациях обычно питаются от 48 вольт, МОП-транзисторы представляют собой лучшую используемую технологию транзисторов).

#### Высоковольтный повышающий трансформатор

Высокочастотный источник питания переменного тока подключается к трансформатору с высоким коэффициентом повышения. В ОПЭ вторичная обмотка трансформатора должна быть изолирована от напряжений, равных или превышающих номинальное напряжение на выходе ОПЭ (обычно 2х, для обеспечения высокой надежности).

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Использование и применение источника питания****Выходной выпрямитель**

Поскольку на выходе требуется источник постоянного тока, необходимо снова инвертировать переменный ток обратно в постоянный. Эта задача решается посредством высокоскоростных высоковольтных выпрямительных диодов. (Описанные этапы преобразования туда-сюда могут показаться глупым процессом для неспециалиста в сфере электропитания, но на самом деле это оптимальный способ достичь конечной цели).

**Управление**

Все конструктивные блоки преобразователя контролируются и управляются электронной схемой управления. В современных преобразователях в этих схемах используются усовершенствованные цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) и программируемые пользователем матрицы логических элементов (FPGA). В ОПЭ схемы управления сообщаются с системным контроллером ОПЭ для управления и контроля.

Преобразователь устанавливается в легко заменяемый самоподключающийся блок, называемый «сменный блок» (FRU). Большая часть сменных блоков в ОПЭ оснащены самоподключающимися разъемами, что позволяет осуществлять быструю замену в случае отказа.

В ОПЭ часто используется несколько преобразователей для обеспечения модульности и соответствия различным конфигурациям выходного напряжения, а также для резервирования в случае, если какой-либо отдельный преобразователь выходит из строя.

**Уникальные требования к ОПЭ**

На практике преобразователь фактически является наиболее часто используемым компонентом в ОПЭ. (Поэтому понятно, почему преобразовательная часть ОПЭ стала первой частью системы ОПЭ, переданной на подряд). Помимо преобразователя ОПЭ имеет много других функциональных блоков, обеспечивающих перечисленные ниже функции.

**Безопасность**

Несмотря на некоторую неосязаемость, безопасность является основным фактором при разработке ОПЭ. Поскольку кабель может питаться с любого конца (так называемое двухстороннее питание), существует возможность наличия высокого напряжения, даже если локальный ОПЭ выключен. В ОПЭ устанавливаются серьезные системы безопасности. Обычно они включают в себя высокоуровневые резервированные измерительные системы, отказоустойчивые коммутационные устройства, защитные барьеры, ключевые блокировки и системы доступа.

**Надежность**

Поскольку простои обходятся дорого, требования к высокой надежности в телекоммуникационном оборудовании как правило обязательны, и ОПЭ не является исключением. Высокая надежность в ОПЭ достигается за счет сочетания избыточности, применения компонентов с увеличенными против требуемых номинальными пределами и увеличения

расстояния между всеми критическими компонентами. Предельные значения проверяются по строгому плану проверки для обеспечения ожидаемой работы оборудования в наихудших условиях. Во всех высоковольтных блоках внутри ОПЭ должна быть обеспечена защита от коронного разряда, что проверяется в каждом построенном блоке. Поддержание низкого уровня коронирования в высоковольтных блоках является сложной задачей. Она решается посредством узкоспециализированных методов, используемых в высоковольтной промышленности.

**Распределение и мониторинг постоянного тока**

Наличие автоматического выключателя защиты для каждого сменного блока и распределения постоянного тока для всего ОПЭ.

**Локальный контроллер ОПЭ**

Обеспечивает локальное управление и мониторинг ОПЭ посредством графического интерфейса пользователя (GUI). Локальный контроллер обычно состоит из промышленного ПК (сервера), многоканального коммутатора Ethernet, соединяющего все другие модули внутри ОПЭ, клавиатуры, мыши, ЖК-дисплея и/или сенсорного экрана. Локальный контроллер напрямую связывается с системой сетевого управления кабельной станции для мониторинга и контроля предельных значений ОПЭ. (Зачастую из соображений безопасности дистанционное управление настройками ОПЭ отсутствует. Однако современные ОПЭ могут предложить уникальные функции дистанционного управления, которые облегчают дистанционную диагностику проблем ОПЭ или кабелей).

**Мониторинг кабеля и доступ к кабелю****Рис. 2**

Выход преобразователей питает подводный кабель с использованием сложных устройств контроля и защиты. Кабельный доступ и оконцевание (замыкание или размыкание) также обеспечиваются в точке выхода ОПЭ. Эта точка доступа может быть использована для подключения других устройств тестирования кабелей к кабельной трассе. В виду опасности наличия высокого напряжения в этой точке, а также во всем ОПЭ должны быть реализованы сложные функции безопасности. На рис. 2 показан кабель ОПЭ, контролирующей сменный блок, с механизмами доступа и оконцевания кабеля.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

#### Тестовая нагрузка

Блок тестовой нагрузки позволяет тестировать преобразователь в шкафу ОПЭ, в то время как кабель получает питание от резервных преобразователей. Или аналогичным образом оба преобразователя могут быть протестированы тестовой нагрузкой. Тестовая нагрузка является уникальной концепцией в развернутых высоковольтных системах, используемой только в ОПЭ. Традиционно тестовая нагрузка осуществлялась массивом пассивных фиксированных резисторов. Для изменения параметров нагрузки использовались реле высокого напряжения, реализующих выбор и перенастройку фиксированных резисторов. В настоящее время доступны электронные тестовые нагрузки.



Рис. 3

Для таких тестовых нагрузок используется массив активных МОП-транзисторов. Программирование транзисторов обеспечивает фактически бесконечный диапазон конфигураций нагрузки в пределах мощности ОПЭ. Кроме того, тестовые нагрузки могут быть очень компактными. Однако такие современные тестовые нагрузки стоят дороже. С другой стороны, их малый размер может обеспечить значительное уменьшение размера шкафов, используемых только для тестовой нагрузки. Современные ОПЭ могут быть реализованы в одном шкафу, включая тестовую нагрузку! На рис. 3 показана современная электронная тестовая нагрузка 5 кВт, а на рис. 4 — один из массивов МОП-транзисторов.



Рис. 4

#### Шкаф

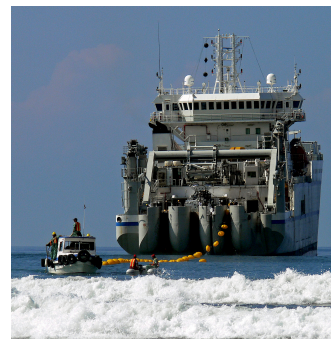
Часто называемый «магазином», шкаф ОПЭ предлагает не только обычные, но и уникальные функции. Комплектное ОПЭ должно соответствовать сейсмическим требованиям по GR-63-CORE. Конструкция шкафа является критическим

фактором для соответствия этому требованию. Из-за индивидуального характера оборудования ОПЭ, шкаф также является индивидуальной конструкцией. Предохранительные блокировки и высоковольтные кабельные трассы требуют индивидуальных решений. Современные ОПЭ с одним отсеком включают в себя уникальные механизмы автоматически закрывающихся дверей, которые позволяют демонтировать сменные блоки при наличии высокого напряжения. Автоматически закрывающиеся двери обеспечивают барьерную защиту с пружинным приводом, которая защищает от контакта с цепями под напряжением при демонтаже модулей. На рис. 5 показано внутреннее пространство шкафа ОПЭ. Практически все механизмы должны быть изготовлены по индивидуальному заказу.



Рис. 5

### ОПЭ для кабелепрокладочных судов



Необходимость в ОПЭ для кабелепрокладочных судов является менее известной, но столь же требовательной к характеристикам. При прокладке кабеля он тестируется с помощью бортовой системы ОПЭ. Во время бума отрасли прокладки кабелей в 90-х годах было введено в эксплуатацию около 100 судовых систем ОПЭ. Эти

судовые системы ОПЭ функционально очень схожи со стандартным наземным ОПЭ, только с уменьшенной функциональностью и требованиями (и с существенно более низкой стоимостью). Бортовое ОПЭ судна может работать от 220 В переменного тока, подаваемого от судовых генераторов, и, как правило, может использовать больше типовых высоковольтных источников питания. (Нет необходимости в аккумуляторах и отсутствие сейсмических событий в море). Но для судового ОПЭ надежность по-прежнему имеет первостепенное значение, поскольку отказ ОПЭ в море прервет развертывание кабеля до прибытия помощи.

### Заключение

Оптимальным путем для разработки и развертывания высокотехнологичных решений ОПЭ оказалось привлечение экспертов в области питания для подводного коммуникационного оборудования и внедрение технологий высоковольтного преобразования энергии. Дальнейшее развитие отрасли видится в сокращении размеров систем с сохранением или увеличением характеристик по напряжению, а также разработка недорогих устройств с низким напряжением (например, для распределительного оборудования).

Благодарим компанию Tyco Telecommunications за их вклад в развитие технологии ОПЭ, передачу опыта в сфере кабелей питания и за предоставленные фотографии.

## Функциональная роль рентгеновских генераторов

Борис Сасик, Сэм Пиндрис и Джим Уиллси

### АННОТАЦИЯ

Благодаря совместной работе рентгеновских генераторов и трубок гарантируется высокая производительность и надежность, которые так необходимы в современных промышленных условиях. Рентгеновские генераторы должны обладать технологичностью и гибкостью, позволяющими адаптировать питание рентгеновских трубок различных производителей в зависимости от требований конкретного заказчика.

В современных рентгеновских трубках используется термокатод, конструкция которого появилась в начале 20 века. Со времени внедрения радиографического контроля эксплуатационные характеристики рентгеновских трубок значительно улучшились благодаря материалам и технологическим процессам, используемым при их производстве, и надежность трубок стала значительно выше. На сегодняшний день рентгеновские трубки остаются наиболее ответственным компонентом рентгеновских систем, учитывая их ограниченный ресурс, типичные виды отказов и чувствительность к ненадлежащим условиям применения. Высоковольтные источники (рентгеновские генераторы) для питания рентгеновских трубок должны обеспечивать стабильные, надежно регулируемые напряжение для ускорения электронов и ток накала для достижения стабильной дозы излучения и обеспечения максимального срока службы трубки. Рентгеновские генераторы поставляются в двух различных исполнениях: моноблочном, когда рентгеновская трубка встроена в единый блок вместе с высоковольтным источником питания, и кабельном, когда питание от отдельного источника питания подается на рентгеновскую трубку по высоковольтному соединительному кабелю. В данной работе рассматриваются основные виды отказов рентгеновских трубок: образование дугового пробоя, обрыв нити накала и перегрев фокусного пятна, а также их влияние на конструкцию рентгеновского генератора. Рентгеновский генератор должен нивелировать высокую энергию, вырабатываемую при появлении дугового пробоя, и предотвращать сильные повреждения рентгеновской трубки. Он также должен обеспечивать максимальный срок службы трубки за счет активного регулирования тока накала и надлежащего охлаждения электронных компонентов и рентгеновской трубки (в случае с генератором Monoblock®). Не стоит недооценивать важность фундаментальных методов проектирования рентгеновского генератора для обеспечения оптимальных эксплуатационных характеристик и длительного срока службы рентгеновской трубки для промышленного применения.

Ключевые слова: рентгеновские генераторы, рентгеновские трубки, высокое напряжение, образование дугового пробоя в рентгеновской трубке, регулирование накала рентгеновской трубки, Monoblock®

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

#### ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская трубка представляет собой электровакуумный прибор, преобразующий поступающую электрическую энергию в рентгеновское излучение. Предшественниками рентгеновских трубок являются опытные трубки Крукса, с помощью которых рентгеновское излучение было впервые «официально» открыто 8 ноября 1895 года немецким физиком Вильгельмом Конрадом Рентгеном. Первым ученым, открывшим рентгеновское излучение, признан именно В. К. Рентген, хотя рентгеновские лучи могли случайно создаваться и другими учеными в ходе более ранних экспериментов. В 1913 году Уильям Кулидж усовершенствовал трубку Крукса, и к 1920 году трубка Кулиджа стала наиболее распространенной рентгеновской трубкой с термокатодом.

В трубке Кулиджа электроны испускаются благодаря термоэлектронной эмиссии, чаще всего с помощью вольфрамовой нити, накаливаемой электрическим током. Нить в трубке является катодом. Между катодом и анодом подается высокое напряжение, при этом происходит ускорение электронов, которые затем сталкиваются с анодом.

Несмотря на то что работа рентгеновской трубки представляется очень простой, выбор подходящего рентгеновского генератора в зависимости от условий применения может обеспечить оптимальные эксплуатационные характеристики, высокую надежность и длительный срок службы трубки.

#### ОТКАЗЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ В КОНЦЕ СРОКА СЛУЖБЫ

Хорошо спроектированная, качественно изготовленная и надлежащим образом применяемая рентгеновская трубка может надежно и бесперебойно работать на протяжении многих тысяч часов. Учитывая необратимый эффект старения, можно выделить два основных типа отказов в конце срока службы: критический дуговой пробой и перегорание нити накала.

#### Дуговой пробой

При штатной эксплуатации нить накала нагревается до высоких температур (выше 1500 °C). Со временем оболочка трубки, находящаяся напротив узлов под высоким напряжением (анод и катод), металлизирована под воздействием медленного процесса, известного как испарение вольфрама. Металлизированный слой увеличивает проводимость поверхности оболочки (выполненной из стекла или керамики), что в итоге приводит к дуговому пробое на стенку трубки. В случае со стеклянными трубками такой дуговой пробой может привести к образованию отверстия в стекле и в итоге — к выходу из строя рентгеновской трубки, как показано на рисунках 1 и 2.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

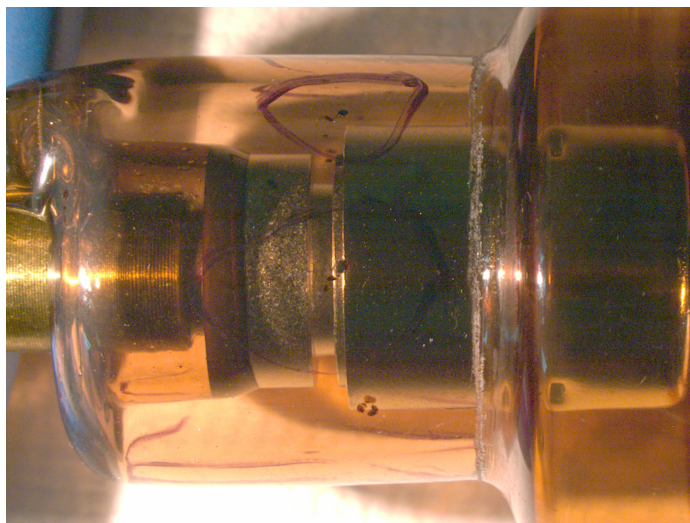
**Использование и применение источника питания**

**Пример контроля дугового пробоя рентгеновским генератором**

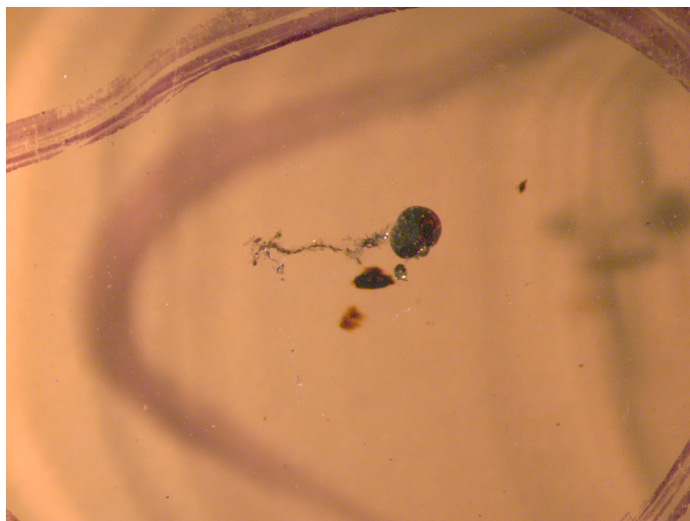
Во многих конструкциях генераторов контроль пробоя обеспечивается цифровым сигнальным процессором (ЦСП) или микроконтроллером с целью гашения дугового пробоя. Этот процесс зачастую называется «откатом». При возникновении разряда важно, чтобы генератор быстро отключил генерацию высокого напряжения и вернул высокое напряжение обратно на уровень  $-5\%$  от значения в момент образования разряда, тем самым давая некоторое время для восстановления трубки и поглощения всех оставшихся молекул газа. Все описанные выше шаги занимают менее 1 мкс. Современные рентгеновские генераторы имеют полностью программируемые схемы контроля разрядов, которые могут быть отрегулированы пользователем для различных условий применения и подстроены к конкретным требованиям к трубкам.

**Выявление дугового пробоя**

Токи разряда определяются трансформатором тока в схеме обратной связи высокого напряжения рентгеновского генератора, как показано на рисунке 2а.

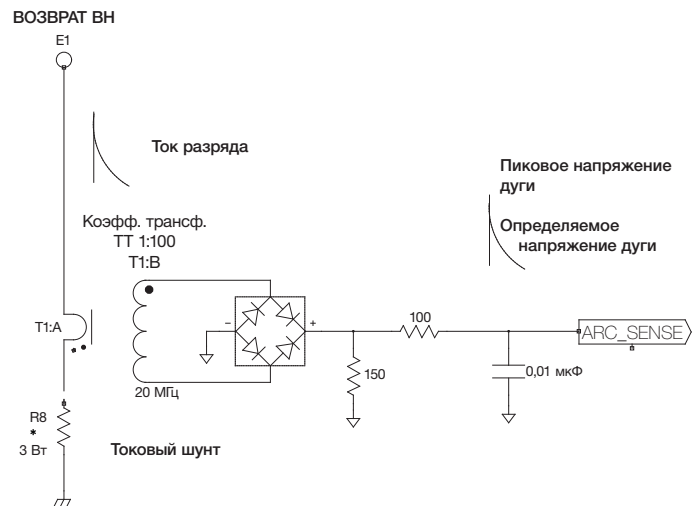


**Рис. 1. Стекло́нная трубка с многочисленными следами дугового пробоя, некоторые из которых привели к образованию отверстий в стекля́нной оболочке**



**Рис. 2. Увеличенное изображение стекля́нной поверхности в месте поврежде́ния стенки трубки**

Этот тип неисправности характерен для рентгеновских трубок, используемых при напряжении, близком к максимальному (номинальному) напряжению. Испарение вольфрама имеет меньшее влияние на металлокерамические рентгеновские трубки, поскольку их конструкция обеспечивает минимальное отложение вольфрама на стенках трубки. Однако, учитывая неизбежное испарение вольфрама во всех рентгеновских трубках, рентгеновский генератор должен обеспечивать средства контроля дугового пробоя за счет применения пассивных и активных схем для отключения высоковольтного питания и восстановления работы после пробоя с целью продления срока службы рентгеновской трубки.



**Рис. 2а. Пример схемы определения разряда в рентгеновском генераторе**

**Пример программы масштабирования при обнаружении дуги до уставки высокого напряжения**

Сигнал обратной связи о разряде (ARC SENSE) подается на компаратор на системной плате управления, настроенной на определение предельного тока разряда и контрольный уровень высокого напряжения. С помощью этой схемы можно предотвратить ложное определение дугового пробоя, при этом микроразряды игнорируются. Сигнал ARC поступает и фиксируется в программируемой пользователем матрице логических элементов (FPGA) в течение сотен наносекунд и отключает генерацию высокого напряжения с целью гашения дугового разряда. Это гашение называется «откатом».

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

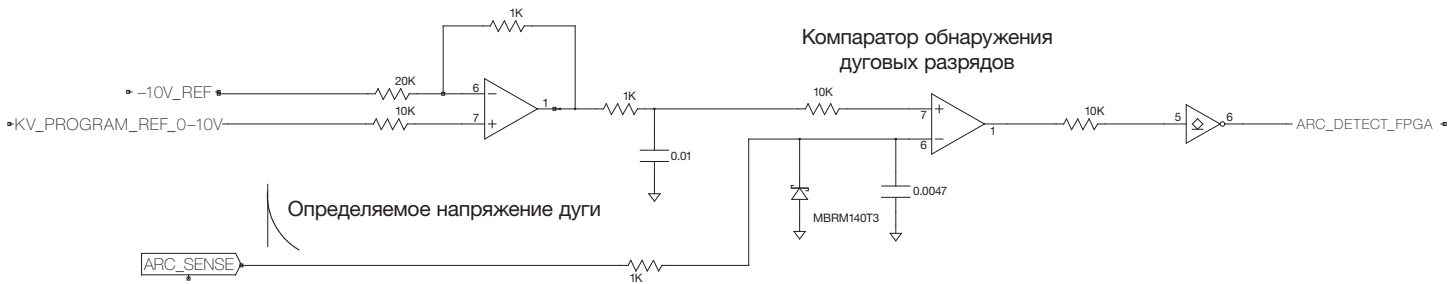


Рис. 2б. Пример схемы обнаружения разряда в рентгеновском генераторе

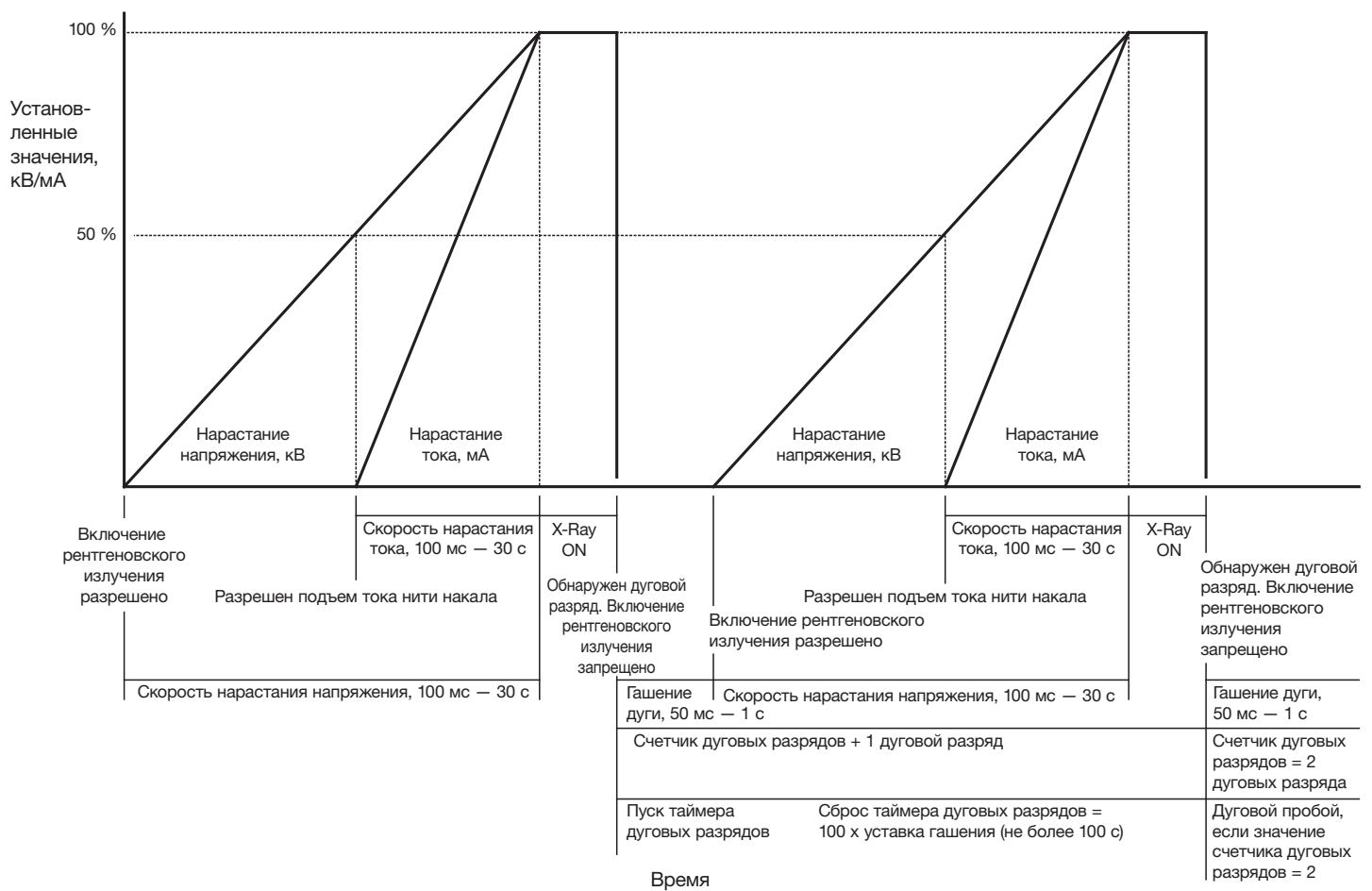


Рис. 2с. Пример дугового пробоя с «откатом» напряжения, гашением пробоя и восстановлением генерации

Пример восстановления генерации после обнаружения дугового пробоя

После обнаружения пробоя регулятор высокого напряжения выполняет «откат», а ЦСП отвечает за определение того, целесообразно ли восстанавливать высокое напряжение или выдавать сигнал о критическом дуговом пробое. При каждом дуговом пробое ЦСП будет увеличивать значение счетчика дуговых разрядов. Если обнаружен первый дуговой разряд, а пороговое значение для количества дуговых разрядов >1,

ЦСП отсчитывает время гашения пробоя и повторно включает высокое напряжение. Эта последовательность может продолжаться до тех пор, пока количество выявленных дуговых разрядов не превысит количество дуговых разрядов, запрограммированных в регистре пороговых значений счетчика дуговых разрядов. Пороговые значения времени гашения разряда и счетчика дуговых разрядов могут быть заданы пользователем в настройках пользователя.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Использование и применение источника питания

НЕТИПИЧНЫЕ ОТКАЗЫ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК

Отказы рентгеновских трубок на ранних этапах зачастую являются результатом применения неверной технологии производства, использования неподходящих материалов или неправильного применения трубок. Первые две причины связаны с процессами обеспечения качества на предприятии-изготовителе, при этом мы в большей степени заинтересованы в надлежащей работе рентгеновских трубок с точки зрения работы рентгеновского генератора.

Рентгеновский генератор может продлить срок службы трубок за счет обеспечения устойчивого выходного напряжения с низким уровнем пульсаций, условий низкого пускового напряжения и надлежащей изоляции высокого напряжения в соответствующей требованиям охлаждающей среде, как в случае с промышленными блоками Monoblock®.

Нарастание тока накала

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на долговечность промышленных рентгеновских трубок, является плавное поднятие напряжения нити накала при включении. Для достижения нитями накала рабочей температуры требуется несколько сотен миллисекунд. Если повышение тока на нити накала происходит слишком быстро, на нити возникает значительное механическое напряжение, при этом преимущества от быстрого увеличения выходной мощности рентгеновского излучения будут минимальными. Такой сценарий показан на рисунке 4.

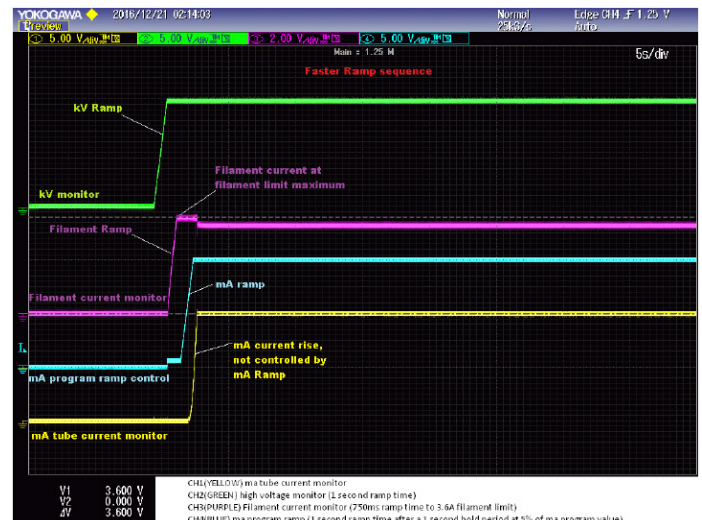


Рис. 4. Ток накала и выходной ток при быстром нарастании тока накала

В этом случае ток накала (фиолетовая кривая) быстро увеличивается, но температура нити, отвечающая за выходной ток (желтая кривая), не может быстро достичь рабочего тока. В итоге схема с обратной связью по току (mA) будет повышать ток нити накала до заданного максимума до тех пор, пока нить не нагреется до температуры, достаточной для начала эмиссии электронов рентгеновским генератором. В этот момент ток (mA) быстро увеличится и далее не будет

Перегорание нити накала

Даже когда рентгеновские трубки работают при напряжении, значительно меньшем максимального (номинального) значения, все равно происходит металлизация оболочки. Однако, учитывая более низкую скорость отложения металла и повышенное номинальное напряжение, образование дугового пробоя не является основной причиной отказа. Согласно кривым зависимости тока (mA) в трубке от тока нити накала, приведенным на рисунке 3, при фиксированном выходном токе в трубке ток нити накала увеличивается по мере снижения выходного напряжения.

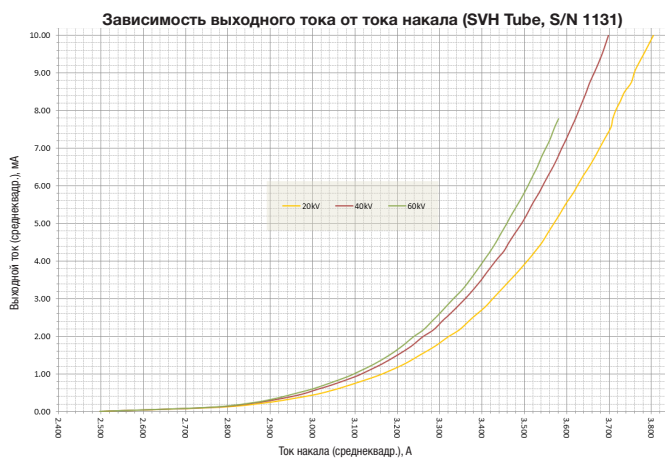


Рис. 3. Типовые характеристики рентгеновской трубки. При снижении напряжения на аноде рентгеновской трубки для поддержания постоянного выходного анодного тока ток нити накала необходимо увеличивать.

При повышенном токе нити накала, который свидетельствует о необходимости более высокой температуры нити накала, происходит ускоренное испарение материала нити, пропорционально T в четвертой степени (где T – температура нити накала в Кельвинах): даже незначительное увеличение температуры нити накала при возведении в четвертую степень приводит к значительному увеличению испарения материала нити.

При испарении вольфрама нить истончается, что в конечном итоге приводит к механическому разрыву нити. Считается, что если масса нити накала снизилась приблизительно на 10 %, то срок службы нити истек (нить исчерпала свой ресурс на 98 %). Такое сокращение массы соответствует сокращению диаметра нити приблизительно на 5 %.

Не все рентгеновские трубки обладают одинаковыми характеристиками накала. Разные характеристики накала требуют разные параметры контроля для обеспечения стабильного тока эмиссии. Высокотехнологичные универсальные генераторы обладают такими способностями управления эмиссией, которая позволяет работать со многими рентгеновскими трубками. Некоторые рентгеновские трубки могут не попадать в данную категорию и требуют специальных настроек для обеспечения стабильной эмиссии.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

**Использование и применение источника питания**

**Влияние длины высоковольтного кабеля на нити накала с питанием переменным и постоянным током**

Как говорилось ранее, одним из наиболее важных параметров трубки является предельное значение тока для нити накала. Предельные значения тока ограничивают максимальный выходной ток источника питания нити накала для защиты нити в рентгеновской трубке. Заданное значение должно быть равно или ниже указанного производителем в техническом паспорте. При этом необходимо учитывать и другие факторы.

**Питание нитей накала переменным током.** Нити накала с питанием переменным током работают на высокой частоте, за счет чего подача энергии по длинным высоковольтным кабелям становится затруднительной из-за большого сопротивления. На калибровку нити накала может повлиять изменение длины высоковольтного кабеля, поэтому может потребоваться изменение настроек калибровки нити.

**Питание нитей накала постоянным током.** Следует учитывать потери в медных высоковольтных кабелях, связанные с сортаментом проволоки и длиной кабеля. При использовании источника питания нитей накала постоянным током со схемой регулирования тока нет необходимости в дополнительных регулировках, если используемый высоковольтный кабель не длиннее максимальной установленной длины.

**Настраиваемые пользователем параметры рентгеновского генератора**

С помощью универсального рентгеновского генератора обеспечивается питание для различных рентгеновских трубок, используемых в самых разных условиях. Стандартные значения увеличения напряжения (кВ), выходного тока (мА) и тока накала должны быть по умолчанию выставлены на максимальную скорость нарастания, которая будет обеспечивать соответствие требованиям к конкретным условиям применения, но оставаться в заданных изготовителем пределах для безопасного регулирования процессов в трубке. Для трубок с другими параметрами, которые не соответствуют стандартным настройкам по умолчанию, должна быть предусмотрена простая перенастройка параметров.

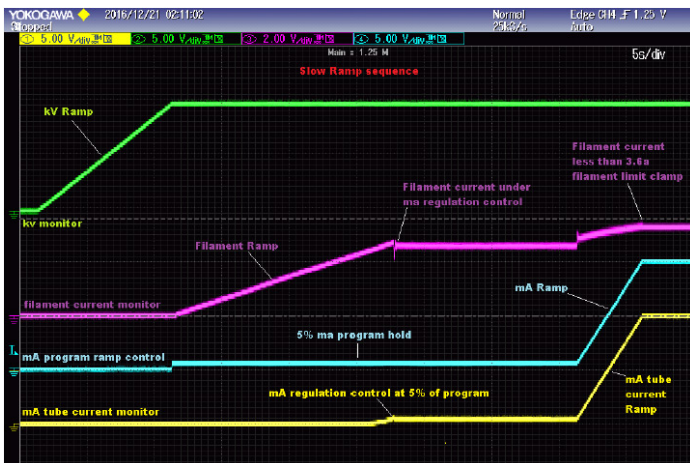
Некоторые стандартные рентгеновские генераторы обладают расширенными настройками и высоким уровнем индивидуализации.

На рисунке 5а приведен снимок графического пользовательского интерфейса, с помощью которого пользователи могут выполнить индивидуальную настройку рентгеновского генератора для конкретных условий его применения, оптимизировать эксплуатационные характеристики трубки и генератора, а также обеспечить защиту и продлить срок службы рентгеновской трубки. Многие из указанных выше основных параметров можно легко и быстро установить в программе.

регулироваться согласно схеме повышения тока (мА) (голубая кривая). Витки нити накала подвергаются воздействию высокого тока в течение нескольких сотен миллисекунд, и этот процесс повторяется при каждом включении рентгеновских генераторов. Быстрый подъем напряжения накала может быть основным фактором, вызывающим преждевременные отказы нитей накала.

Для минимизации этого эффекта в правильно спроектированном рентгеновском генераторе будет использоваться программа для увеличения тока нити и прописаны предельные значения, которые могут быть выбраны индивидуально с учетом рекомендаций изготовителя для конкретной рентгеновской трубки. Один из таких примеров показан на рисунке 5.

Наиболее важной настройкой для защиты нити накала рентгеновской трубки является предельное значение тока для нити. Настройка предельного значения тока для нити — это настройка максимального тока, указанная изготовителем рентгеновской трубки для достижения максимального тока эмиссии при минимальном значении высокого напряжения (кВ). Настройка данных требований происходит при установке трубки. Максимальные значения тока для нити могут быть заданы ниже значений, рекомендованных изготовителем, если при использовании достигается требуемый ток эмиссии.

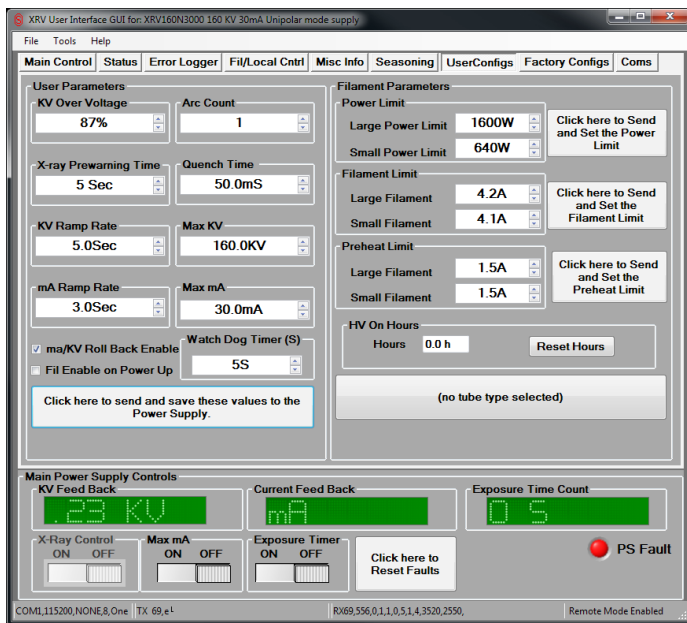


**Рис. 5. Оптимизированное повышение тока нити накала сокращает механическое напряжение нити рентгеновской трубки**

Если время повышения тока нити регулируется в соответствии с тепловыми свойствами нити, то предельные значения тока не будут достигаться и максимальное значение тока будет установлено как рабочее. Более того, нить накала достигает рабочей температуры к моменту включения схемы управления током эмиссии, что приводит к корректному повышению тока трубки (желтая кривая), которое регулируется схемой управления (голубая кривая).

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

**Использование и применение источника питания**



**Рис. 5а. Снимок графического пользовательского интерфейса для настройки конфигурации управления трубкой**

В приведенной ниже таблице содержатся данные о возможностях настройки некоторых рентгеновских генераторов. Все условия применения рентгеновского излучения имеют свои отличительные особенности, и очень важно правильно и бережно работать с рентгеновской трубкой.

Параметр/функция	Диапазон	Значение по умолчанию	Примечания
Предельные настройки накала, верхняя граница XRV160,225 XRV320,450	0–4000 Вт 0–4500 Вт	3000 Вт 4500 Вт	См. данные по трубке
Предельные настройки накала, нижняя граница XRV160,225 XRV320,450	0–4000 Вт 0–4500 Вт	3000 Вт 4500 Вт	См. данные по трубке
Макс. напряжение, кВ XRV160 XRV225 XRV320 XRV450	0–160 кВ 0–225 кВ 0–320 кВ 0–450 кВ	160 кВ 225 кВ 320 кВ 450 кВ	
Макс. ток, мА	0–30 мА	30 мА	
Предельный ток накала, верхняя граница	0–6 А	4 А	Расчетный ток при фактической нагрузке
Предельный ток накала, нижняя граница	0–6 А	4 А	Расчетный ток при фактической нагрузке
Ток прогрева нити накала, верхняя граница	0–6 А	2 А	Типовое значение: Предельный ток, Верхняя граница/2
Ток прогрева нити накала, нижняя граница	0–6 А	2 А	Типовое значение: Предельный ток, Нижняя граница/2
Счетчик дуговых разрядов	0–30	1	
Время гашения дугового разряда	10 мс — 1 с	50 с	Показания счетчика будут сброшены при значении 100x заданное значение (не более 100 с)
Скорость нарастания напряжения (кВ)	100 мс — 30 с	5 с	Типовое значение 5 с
Скорость нарастания тока (мА)	100 мс — 30 с	5 с	Типовое значение 5 с
Время предупреждения	0–30 с	1 с	Предупреждение перед включением высокого напряжения (включение рентгеновского излучения)

**Рис. 5б. Пример настраиваемых параметров рентгеновского генератора**

И без того достаточно простой процесс внесения значений параметров рентгеновских трубок в генератор может быть значительно упрощен. Если используется стандартная рентгеновская трубка серийного производства, изготовитель генератора может легко внести значения в базу данных, чтобы пользователю нужно было лишь выбрать необходимую модель трубки и автоматически загрузить необходимые настройки. Таким образом, процесс настройки упрощается, а также обеспечивается дополнительное преимущество исключения человеческого фактора при подготовке трубки и генератора к совместной работе. Параметры для не включенных в базу данных трубок можно легко добавить и сохранить.

В следующем разделе описывается генератор с возможностью автоматической загрузки настроек рентгеновских трубок путем выбора модели трубки из раскрывающегося списка.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

#### Высоковольтная изоляция

Одной из основных проблем, связанных с проектированием промышленных моноблоков Monoblock®, является обеспечение среды с низким электрическим напряжением для работы рентгеновской трубки. Помимо надлежащей высоковольтной изоляции, также важно учитывать максимальное электрическое поле и методики распределения данного поля. Проблемы, связанные с ненадлежащими мерами распределения электрического напряжения, могут привести к внезапным и быстрым отказам, например к образованию сквозных отверстий в стекле, как показано на рисунке 6.

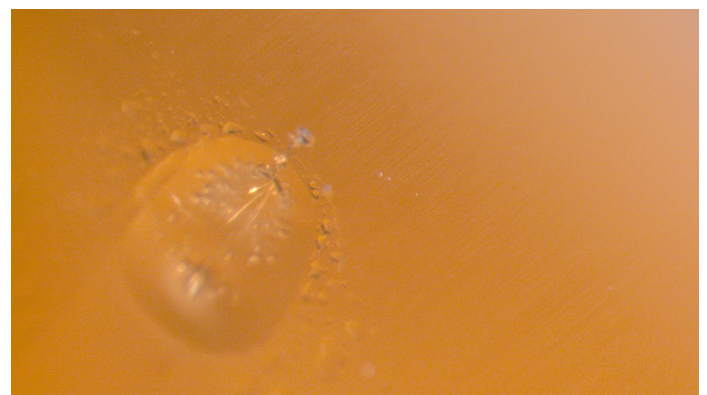


Рис. 6. Отверстие в стеклянной трубке, образованное под воздействием высокого электрического напряжения

В случае трубки, показанной на рисунке 6, стеклянная оболочка была пробита одним дуговым разрядом. Типичным для этого типа отказа является отсутствие черных отметин, характерных для отверстий, образующихся в конце срока службы, когда происходит множество дуговых разрядов, приводящих к карбонизации перед окончательным отказом трубки.

Еще одной проблемой, связанной с ненадлежащим моделированием электрического поля, являются скрытые отказы, при которых заряженные частицы начинают протравливать стекло, что приводит к повышенному току утечки, постепенному повышению количества дуговых разрядов и, в конечном итоге, к окончательному отказу трубки. Этот тип отказа показан на рисунках 7 и 8.

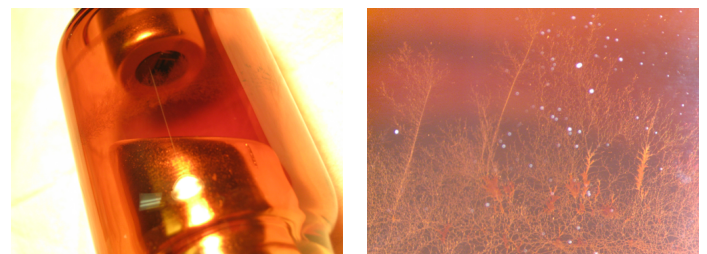


Рис. 7, 8. Стеклянная оболочка с протравлениями, образовавшимися под действием электрического поля

#### Автоматическая загрузка параметров трубок с помощью раскрывающегося меню

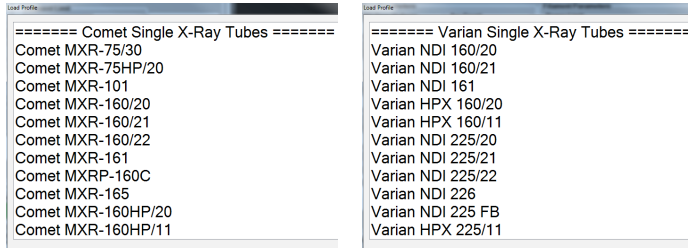


Рис. 5с. Раскрывающееся меню в графическом пользовательском интерфейсе для автоматической загрузки необходимых настроек трубки

Если используемая рентгеновская трубка выполнена по индивидуальному заказу или не включена в раскрывающееся меню, настройки трубки можно ввести вручную, сохранить их и в дальнейшем выбирать из списка.

#### Профили автоматической и индивидуальной тренировки трубки:

Помимо возможности выбрать модель трубки из раскрывающегося меню и загрузить информацию профиля, также имеется возможность использования рекомендованных изготовителем программ тренировки трубок. В зависимости от того, когда рентгеновская трубка использовалась или тренировалась в последний раз, генератор может автоматически выбрать подходящий профиль для тренировки трубки. Для всех трубок в раскрывающемся списке имеются ежедневные, еженедельные и ежемесячные профили для тренировки, а для трубок, не включенных в этот список, можно создать индивидуальные профили.

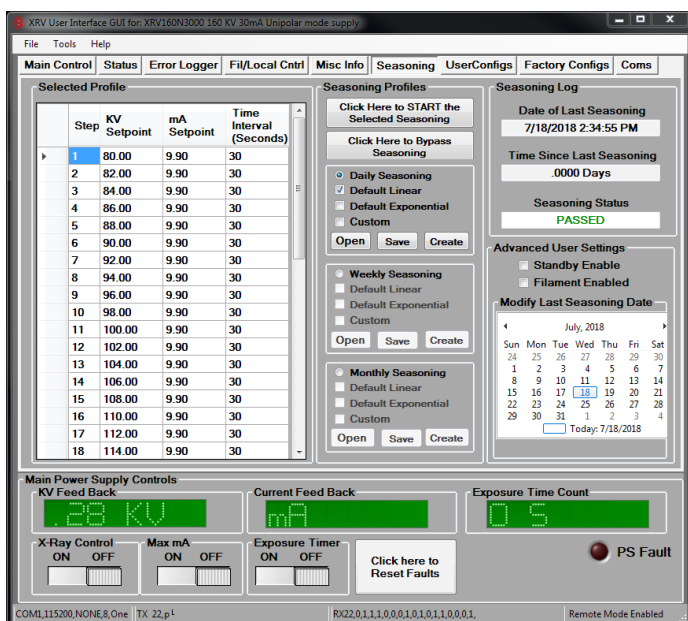


Рис. 5д. Снимок графического пользовательского интерфейса для тренировки трубок

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

**Использование и применение источника питания**

Этот тип отказа формируется в течение нескольких недель или даже месяцев. Он является особо критичным на ранних стадиях, поскольку его сложно заметить: ток утечки начинает увеличиваться, что приводит к ошибкам в измерении выходного тока, поскольку часть измеренного тока не участвует в формировании рентгеновского излучения. Фактически доза рентгеновского излучения начинает сокращаться, хотя кажется, что ток трубки эффективно контролируется. Далее возникает случайный дуговой разряд, и с течением времени частота образования дуговых разрядов увеличивается, что приводит к устойчивой неисправности трубки.

**Терморегулирование**

Рентгеновские трубки являются устройствами с крайне низким КПД. В форму рентгеновского излучения переходит менее 1 % мощности, а более 99 % рассеивается в виде тепловой энергии. Для обеспечения длительного срока службы рентгеновской трубки эту тепловую энергию необходимо надлежащим образом контролировать для предотвращения значительного повышения температуры.

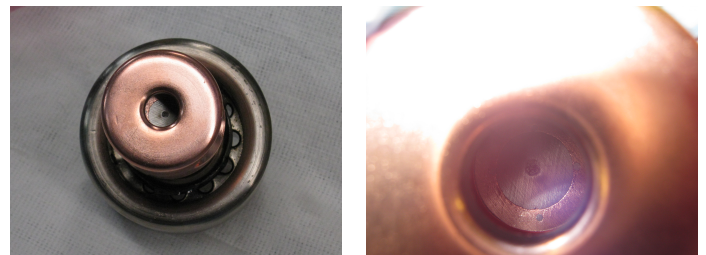
Обычно в качестве охлаждающей среды используется трансформаторное масло с оптимальным сочетанием изоляционных и тепловых свойств. За счет этих свойств обеспечивается достаточно простая циркуляция масла по различным теплообменникам для эффективного регулирования температуры при различных условиях.

Без надлежащего терморегулирования рентгеновская трубка может подвергаться трем основным видам воздействия:

- 1) Повышенная внутренняя температура и скорость испарения, что приводит к разрушительным дуговым разрядам.
- 2) Повышение температуры стекла, которое приводит к пригоранию масла, что, в свою очередь, увеличивает фильтрацию рентгеновского излучения и ухудшает изолирующие свойства масла, что может привести к диэлектрическому пробоем во многих частях высоковольтных блоков. Трубка без надлежащего охлаждения с проблемой такого типа показана на рисунке 9.
- 3) Ненадлежащее отведение тепла от анодного узла, в результате чего рабочая температура рентгеновской трубки превышает температуру плавления вольфрама. Это приводит к плавлению фокусного пятна, что имеет три критических побочных эффекта:
  - a. Увеличение размера фокусного пятна
  - b. Более жесткое рентгеновское излучение в связи с дополнительной фильтрацией
  - c. Дополнительное испарение вольфрама, приводящее к металлизации и неустраняемым отказам трубок



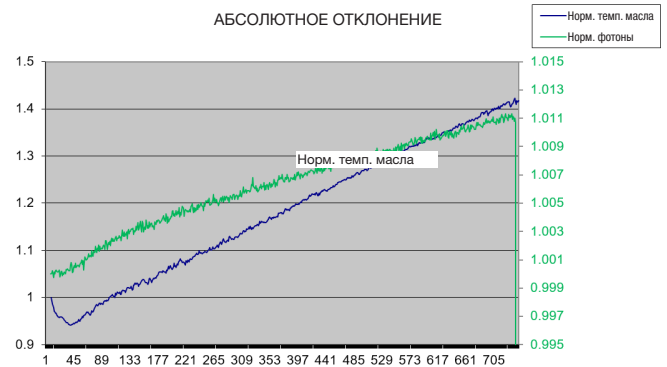
**Рис. 9. Рентгеновская трубка, работающая в среде горячего масла с тонким слоем обуглившегося масла на поверхности**



**Рис. 10, 11. Повреждение фокусного пятна из-за недостаточного охлаждения анода и термомеханического воздействия**

**Стабильность дозы излучения**

Развитие технологии производства детекторов открывает двери для новых областей применения и повышения качества визуализации. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость использования источников рентгеновского излучения более высокого качества. Одним из необходимых требований является стабильность дозы рентгеновского излучения. Стабильность дозы рентгеновского излучения во многом зависит от рабочей температуры рентгеновской трубки. Изменение температуры трубки может составлять более 10 %. На рисунке 12 приведена схема для лучшего понимания этого процесса.



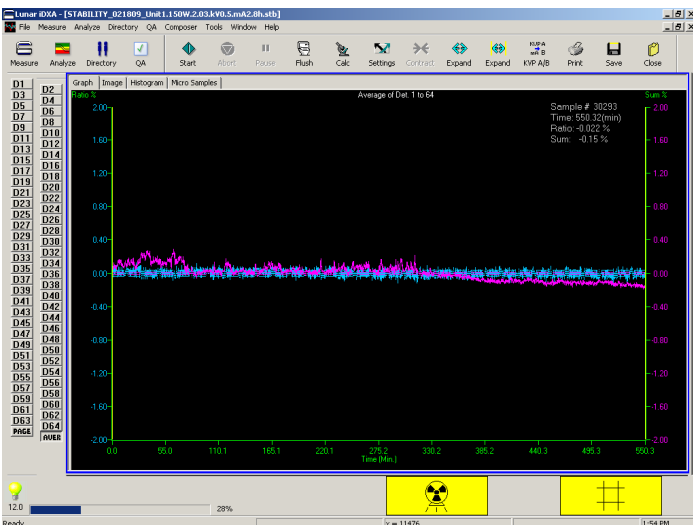
**Рис. 12. Отклонение дозы рентгеновского излучения в зависимости от рабочей температуры. По горизонтальной оси отложено время в секундах**

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Использование и применение источника питания

Применение аналоговой компенсации температуры вместе с цифровой оценкой параметров и компенсацией позволяет уменьшить это существенное отклонение дозы до пренебрежимо малого уровня. На рисунке 13 показаны эксплуатационные характеристики оптимизированного источника рентгеновского излучения. Здесь показано максимальное отклонение, скомпенсированное до уровня ниже 0,4 %.

Было бы ошибочным недооценивать важность использования генератора, разработанного с учетом требований рентгеновской трубки. Как отмечалось выше, полезный срок службы рентгеновской трубки устанавливается с учетом известных неизбежных причин отказа. При выборе компонентов системы визуализации следует всегда уделять первоочередное внимание генератору, обеспечивающему длительный ресурс и высокие эксплуатационные характеристики рентгеновских трубок, то есть генератор должен быть надежным, универсальным и простым в эксплуатации и иметь невысокую стоимость.



**Рис. 13. Эксплуатационные характеристики компенсированного источника рентгеновского излучения.**

На графиках показана сумма фотонов низкой и высокой энергии (фиолетовая кривая — пропорционально эквивалентной стабильности тока, мА) и отношение фотонов высокой и низкой энергии (синяя кривая — пропорционально эквивалентной стабильности напряжения, кВ)

### Потеря дозы в результате снижения мощности

Если выходная мощность трубки мгновенно теряется, на поверхности мишени анода произойдет резкое падение температуры, что приведет к созданию механического напряжения на поверхностном слое. Это может привести к образованию трещин на поверхности мишени, деградации фокусного пятна и потере дозы рентгеновского излучения. После 10 000 циклов относительная потеря дозы может составлять 80 % от начальной дозы. Работа с уровнем мощности, на 20 % ниже максимальных значений, или реализация плавного снижения мощности в работе генератора может значительно сократить механическое напряжение на поверхности мишени.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мере развития промышленных технологий визуализации и повышения требований к источникам рентгеновского излучения все более важным становится совместное использование трубок и генераторов для обеспечения их высокой производительности, надежности и низкой стоимости. Для того чтобы даже самые лучшие рентгеновские трубки показывали максимальную производительность и были защищены от типичных причин отказа, необходимо использовать качественные генераторы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.) А. Уилсон: «Срок службы вольфрамовых нитей накала при постоянном нагреве током», Журнал прикладной физики, том 40, № 4, стр. 1956, 15 марта 1969 г.
- 2.) Джоунс, Маккей: «Скорости испарения и давление паров вольфрама», Физическое обозрение, том XX № 2, август 1927 г.
- 3.) Т. Ньютон, Д. Г. Поттс: «Радиология черепа и мозга — технические аспекты компьютерной томографии». Компания С. V. Mosby, 1981 г.
- 4.) У. Х. Коул: «Технология материалов для электронных трубок», издательство Reinhold Publishing Corporation, 1951 г.
- 5.) Руководство по применению, Stupakoff Ceramic and Manufacturing Co.
- 6.) Рентгеновская трубка, (без даты), Wikipedia, данные взяты по состоянию на 6 июля 2018 г. Источник: [https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray\\_tube](https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_tube)

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Научные статьи

### Проектирование и испытание импульсной нагрузки высокой мощности

Алекс Покрываило, Костел Карп и Клифф Скейпелатти  
Компания Spellman High Voltage Electronics Corporation

Представлено на 28-м Международном симпозиуме по силовым модуляторам (28th Int. Power Modulators Symp.), Лас-Вегас, 27–31 мая, 2008 г., стр. 181–184

#### КРАТКИЙ ОБЗОР

В настоящей статье описывается конструкция и испытание двухканальной импульсной нагрузки мощностью 52 кВт. К числу основных характеристик таких нагрузок относится исключительно низкая паразитная индуктивность, порядка 200 нГн. Такая низкая индуктивность была необходима из-за высоковольтного тока с микросекундной длительностью импульсов, ее удалось достичь благодаря компактной конструкции и тщательной проработанной компоновке. Небольшой размер — предварительное условие для минимизации индуктивности; он был достигнут за счет принудительного жидкостного охлаждения. Неиндуктивные объемные резисторы использовались при таких значениях мощности, которые значительно превосходили их подробные технические характеристики для работы на воздухе, но они успешно справились с возложенной на них задачей. Они размещались в стандартных барабанах из нержавеющей стали. Вода для охлаждения (смесь воды и пропилен-гликоля) циркулировала через теплообменник.

В статье подробно описываются различные аспекты указанной конструкции, в том числе: выбор сопротивлений, расчет индуктивности нагрузки, выбор шин, детали кинематической схемы, теплопередача, высокое напряжение, безопасность, а также параметры хладагента и т. д. Особое внимание уделялось тому, как избежать турбулентного потока, который мог бы привести к растрескиванию резистора. Измерения индуктивности продемонстрировали результаты, близкие к расчетным. Испытание при большой мощности показало надежность работы с перегревом приблизительно на 40 К выше окружающей среды.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

В различных областях с применением высоковольтных источников, например испытательных системах проверки заряда конденсаторов, наносекундных и пикосекундных генераторах импульсов и т. д., широко используются импульсные резистивные эквиваленты нагрузки. К таким нагрузкам предъявляются особые требования, которые отличают их от более традиционных нагрузок постоянного или переменного тока. Одно из самых жестких требований заключается в обеспечении низкой паразитной индуктивности. Она должна иметь порядок нескольких сотен наногенри, а при работе с микросекундными и наносекундными импульсами — порядка десятков наногенри, соответственно. Обычно паразитную индуктивность сводят к минимуму благодаря использованию

низкоиндуктивных схем, предпочтительнее всего коаксиальных, а также минимизации общего размера нагрузки. При высокой средней мощности и высоком напряжении последнее условие трудно выполнимо без эффективного охлаждения и соблюдения требуемых изоляционных зазоров. Дополнительное типичное требование — это хорошая длительная стабильность сопротивления. В связи с этим, в сущности, исключается использование различных водных растворов, таких как водные растворы медного купороса.

В настоящей статье описывается конструкция и испытание двухканальной нагрузки мощностью 52 кВт, используемой при разработке зарядного устройства конденсатора с высокой частотой повторения импульсов.

#### 2. КОНСТРУКЦИЯ

##### А. Технические характеристики

Нагрузка была разработана с учетом следующих спецификаций:

1. Аккумулирующая способность  $C = 5,3$  мкФ (на канал)
2. Максимальное напряжение зарядки:  $V_{ch} = 1200$  В
3. Максимальная средняя мощность  $P_{av} = 52$  кВт (26 кВт на канал)
4. Ширина импульса:  $t_{pulse} \approx 5$  мкс
5. Макс. частота следования импульсов (PRF): 60 кГц
6. Индуктивность нагрузки:  
(на канал, за исключением выводов)  $L_{load} \approx 0,2$  мкГн
7. Перемена полярности  
(при максимальной напряжении зарядки):  
- в нормальном рабочем режиме 200 В  
- при аномальной эксплуатации 600 В
8. Возможность перенастройки для работы с импульсным напряжением в несколько десятков кВ

##### В. Аспекты построения схемы — выбор сопротивления

Испытательная схема может быть представлена в виде схемы разряда конденсатора на  $r$ ,  $L$  схемы, где  $r$ ,  $L$  — нагрузочное сопротивление и индуктивность соответственно (рис. 1). В последнюю входит индуктивность выводов.

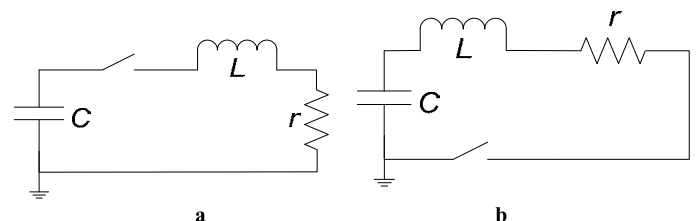


Рис. 1. Эквивалентная схема для определения сопротивления нагрузки и индуктивности

При нулевых начальных условиях, в системе обозначений Маткад, ток нагрузки « $i$ » и напряжение конденсатора « $v$ » задаются формулами:

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

Подбор необходимого сопротивления и изменение конфигурации нагрузки удобно выполнять, используя относительно большое количество постоянных резисторов. Их выбор имеет первостепенное значение и влияет на габаритный размер, стоимость и надежность. Ввиду низкой индуктивности конструкции были выбраны объемные керамические резисторы. Они эффективно работали в наносекундных системах с принудительным масляным охлаждением [1], что позволило добиться небольшого размера и, следовательно, низкой индуктивности. Плоские сопротивления производства компании Kanthal Globar серии 510SP относительно недороги, компактны и просты в установке. Самые крупные детали предназначены для максимального рассеяния мощности в 150 Вт на воздухе; при масляном охлаждении, на основе предшествующего опыта, мы ожидали получить хороший запас надежности при нагрузке в 500 Вт. Непродолжительное испытание резисторов 887SP в ванне с трансформаторным маслом показало, что они способны выдерживать нагрузку в 500–1000 Вт без чрезмерного напряжения конструкции. Главная опасность, согласно указаниям изготовителя, заключается в доведении охлаждающего агента до точки кипения, что приводит к растрескиванию керамики. Таким образом, важно избежать турбулентного потока, чтобы уменьшить температурные перепады на границе раздела.

И, наконец, были выбраны резисторы 6,3 Ом ±20%. С 48 резисторами на канал (~500 Вт на резистор) соединения выглядят так, как показано на рис. 4. Номинальное сопротивление составляет 0,525 Ом, а измеренное значение близко к 0,6 Ом. Нагрузка может быть реконфигурирована до 2,4 Ом, 1,2 Ом или 0,3 Ом без существенных изменений.

$$i(t, L, r) := \frac{V_0}{L \cdot (\alpha_1(L, r) - \alpha_2(L, r))} \cdot (\exp(\alpha_1(L, r) \cdot t) - \exp(\alpha_2(L, r) \cdot t))$$

$$v(t, L, r) := -\frac{V_0}{(\alpha_1(L, r) - \alpha_2(L, r))} \cdot (\alpha_2(L, r) \cdot \exp(\alpha_1(L, r) \cdot t) - \alpha_1(L, r) \cdot \exp(\alpha_2(L, r) \cdot t))$$

где

$$\alpha_1(L, r) := \frac{-r}{2L} + \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{L \cdot C}} \quad \alpha_2(L, r) := \frac{-r}{2L} - \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{L \cdot C}}$$

При индуктивности заданного контура L = 1,5 мкГн перемена полярности приблизительно 200 В и tpulse ≈ 5 мкс реализуются с помощью сопротивления нагрузки r = 0,6 Ом (рис. 2). Перемена полярности в ≈ 600 В может быть обеспечена путем повышения индуктивности выводов до 10 мкГн или путем уменьшения r до 0,25 Ом. На рис. 3 демонстрируются формы кривой напряжения на конденсаторе для безындуктивного разряда (L = 0,2 мкГн) и искусственно увеличенной индуктивности L = 10 мкГн.

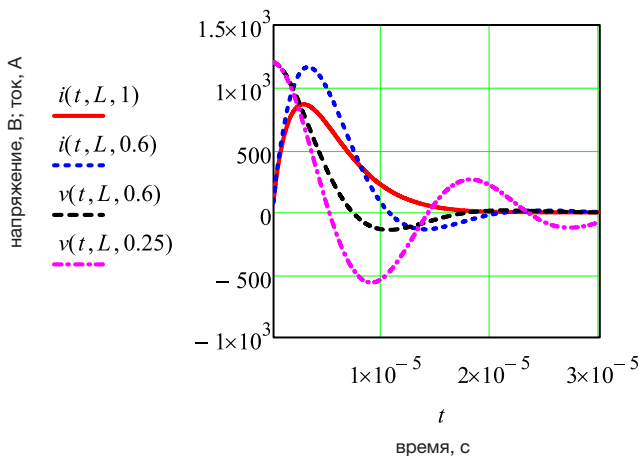


Рис. 2. Формы волны тока и напряжения для L = 1,5 мкГн; значения «r» (в SI), как указано в легендах для переменных. r = 1 Ом соответствуют критическому затухающему разряду

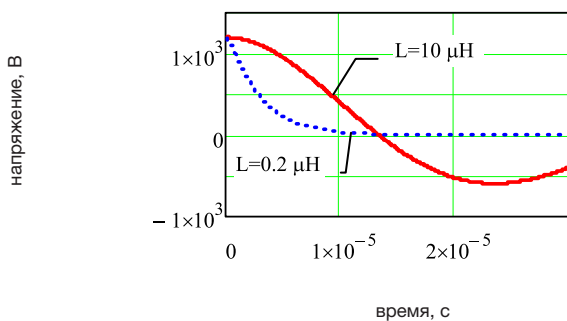


Рис. 3. Формы волны тока и напряжения для r = 0,6 Ом

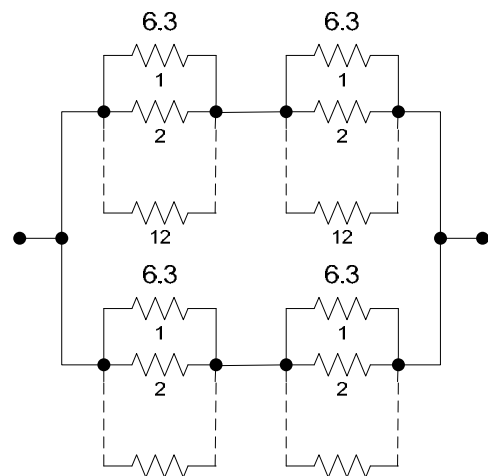


Рис. 4. Электрические соединения (на канал)

С. Механическая схема

Индуктивность нагрузки Lload определяется суммой индуктивности резисторов, а также индуктивности вспомогательных и основных шин. Эквивалентная схема (поясняющая также геометрическое расположение и паразитные сопротивления) показана на рис. 5. Согласно этой схеме, индуктивность Lload может быть вычислена как



$$L_{load} = \frac{(L_R + L_{aub})}{2} + L_{mb},$$

где  $L_R$  — индуктивность группы резисторов 12, а  $L_{aub}$ ,  $L_{mb}$  — индуктивности вспомогательной и основной шины соответственно.

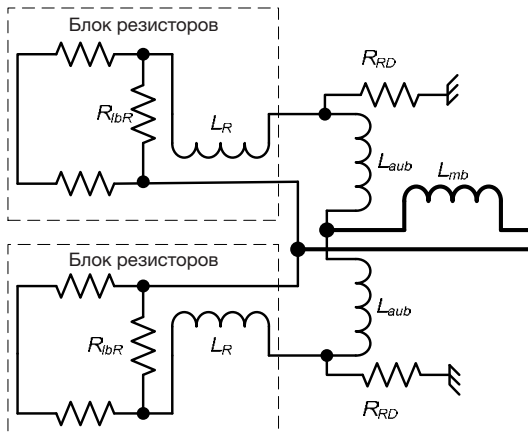


Рис. 5. Эквивалентная схема резистивной нагрузки с учетом паразитной индуктивности и проводимости охлаждающего средства

Уменьшение объема, занимаемого магнитным полем, определяет ключевое условие для достижения низкой индуктивности. С учетом этого сопротивления были подключены параллельно по 12 единиц в группе в одной плоскости, обратная цепь обеспечивалась другой группой из 12 единиц (см. фотографию на рис. 6). Расчет индуктивности при таком расположении элементов может быть выполнен для аппроксимации с плоской шиной при помощи следующей формулы [2]:

$$L_{\frac{m}{m}} := \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{d}{b+c} \right) + \frac{3}{2} + f - \varepsilon \right)$$

где  $\mu_0$  — диэлектрическая проницаемость свободного пространства,  $d$  — среднее расстояние между шинами,  $b$ ,  $c$  — толщина и ширина шины соответственно,  $f$ ,  $\varepsilon$  — табличные значения. Для группы резисторов  $d = 0,06$  м;  $b = 0,02$  м;  $c = 0,3$  м;  $f = 0,8$ ;  $\varepsilon = 0,002$ ; что дает в результате  $L = 2,5 \times 10^{-7}$  Гн/м или  $L_R = 7,5 \times 10^{-8}$  Гн для группы резисторов длиной ~0,3 м. Этот расчет был также подвержен анализу по методу конечных элементов. Поскольку имеется две группы сопротивлений, подключенных параллельно, их индуктивность делится на два (см. эквивалентную схему на рис. 5). Индуктивность вспомогательной и основной шины  $L_{aub}$  и  $L_{mb}$  добавляют ~100 нГн, таким образом ожидается, что полная индуктивность нагрузки не превысит 200–300 нГн. Фактическая измеренная величина составила  $L = 200$  нГн (измеритель иммитанса Quadtech 1920, измерение проводилось при частоте 10 кГц).

Блок резисторов входит в стандартный барабан из нержавеющей стали объемом 75,7 л (рис. 6) и поддерживается главными шинами на крышке из лексана, которая используется так же как проходной изолятор.

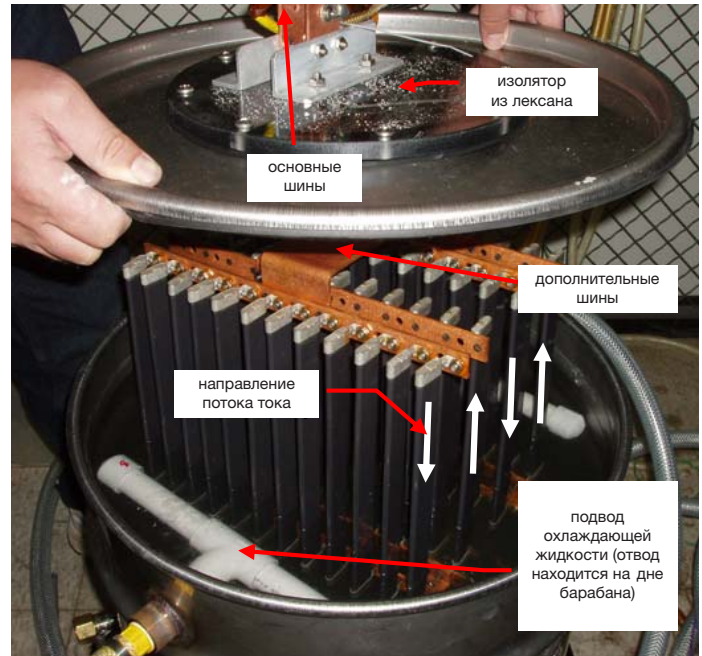


Рис. 6. Резистивная нагрузка погружается в охладитель (один канал). Нагрузка полностью изолирована от барабана

#### Д. Кинематическая схема

Система работает в замкнутом цикле. Под действием насоса хладагент циркулирует по двум бакам с нагрузкой и отдает тепло через теплоотвод, который оснащен вентилятором (рис. 7). Поток контролируется расходомерами, расход можно грубо регулировать клапанами, которые установлены в барабанах. Система шлангов выполнена симметрично относительно нагрузки; конструкцией не предусмотрены никакие другие специальные меры по балансировке нагрузки. Перегрев, который может произойти при отказе насоса, засорении каналов и т. д., предотвращается посредством блокировки с помощью термовыключателей, контролирующих температуру в барабанах.

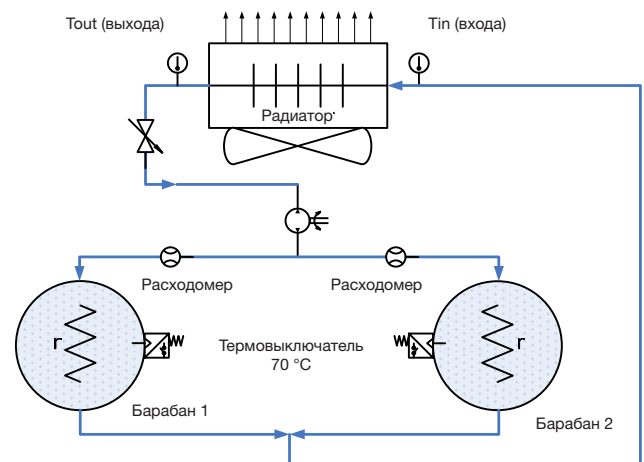


Рис. 7. Кинематическая схема системы охлаждения

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи****Е. Охлаждающий агент**

Изоляционные жидкости, такие как трансформаторное или силиконовое масло, обладают хорошими диэлектрическими и охлаждающими свойствами и, таким образом, идеально подходят для наших целей. Требуемый расход может быть рассчитан по следующей формуле,

$$m = \frac{P}{c_p \Delta T},$$

где  $P$  — рассеиваемая мощность,  $P = 52 \text{ кВт} = 44\,604 \text{ ккал/ч}$ ,  $c_p$  — теплоемкость, или удельная теплоемкость при постоянном давлении, и  $\Delta T$  — требуемая разность температур. Предполагая, что между барабаном и выходом теплообменника  $\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  мы вычисляем массовый расход  $Q_m$  на канал для масла с  $c_p = 2 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$   $Q_m \approx 0,5 \text{ кг/с}$  или объемный расход  $Q_v \approx 30 \text{ л/мин}$ . ( $\approx 8 \text{ гал/мин}$ ). Такой расход можно легко обеспечить обычными насосами. Однако проблема с использованием масла заключается в низкой безопасности, связанной с его воспламеняемостью и риском утечки. Поэтому, несмотря на сомнения относительно электрической прочности и коррозии, мы предпочли этиленгликоль (EG), пропиленгликоль (PG) и их водные смеси, широко используемые как антифризы. Деионизированная вода была отвергнута ввиду предполагаемой коррозии и потери диэлектрических свойств при длительном использовании.

Этиленгликоль и его водные растворы использовались в областях с импульсными источниками питания (см., например [3], [4]) главным образом благодаря большой диэлектрической проницаемости ( $\approx 40$  для этиленгликоля). Для того, чтобы выдерживать длительные импульсы (несколько микросекунд и более), вода должна быть чистой, а раствор — охлажденным.

Данные по удельному сопротивлению этиленгликоля и пропиленгликоля, и особенно их растворов, трудно найти в справочной литературе. Единственная авторитетная ссылка на это свойство была найдена в [5]. Некоторая дополнительная информация содержится в [6]. Согласно [5], удельное сопротивление этиленгликоля составляет  $r \approx 104 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для оценки этого параметра было проведено экспериментальное исследование. Два плоских электрода с площадью  $7 \text{ см}^2$ , расположенные на расстоянии  $0,5 \text{ мм}$ , были погружены в жидкость. Хладагент на базе этиленгликоля компании Prestone (предположительно 97%-й этиленгликоль) имел  $r \approx 140 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  при комнатной температуре и при напряжении постоянного тока  $10 \text{ В}$ . Деионизированная вода имела  $r \approx 0,7 \times 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  при  $200 \text{ В}$ . Таким образом, предполагалось, что удельное сопротивление раствора будет не менее удельного сопротивления этиленгликоля. Как ни странно, измеренные значения можно считать благоприятными в свете экспериментальных данных [7], согласно которым максимальная диэлектрическая прочность для электролитов в квазиоднородных полях при использовании длинных «косях» импульсов при  $r \approx 2 \div 3,5 \times 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Очевидно, что окружающая жидкость играет роль шунта для сопротивлений нагрузки. Для описанной конфигурации сопротивление шунтирующего хладагента (см. рис. 5) можно

оценить в  $10 \text{ Ом}$  при комнатной температуре, что значительно больше, чем сопротивление блока резисторов. Повышение температуры может в сильной степени уменьшить это значение приблизительно на  $20 \div 30 \text{ К}$ , как следует из [3], [4].

При анализе возможных подключений нагрузки (рис. 1), было отмечено, что вариант b, когда нагрузка связана с «землей», предпочтительнее, чем вариант c подачей напряжения только к хладагенту во время разряда конденсатора, вследствие чего хладагент подвергается стрессовой нагрузке в течение лишь нескольких мс. Тогда паразитный ток течет между блоками резисторов (сопротивления  $R_{lbR}$ ), между резисторами и барабаном (сопротивления  $R_{RD}$ ) — см. рис. 5. В варианте a напряжение постоянно присутствует в хладагенте во время заряда, когда электрический ток проходит через  $R_{RD}$ , и пока конденсатор не разрядится.

Следует отметить, что в настоящем исполнении мы уделяли больше внимания стабильности сопротивления, а не диэлектрической прочности: изоляционные промежутки составляют несколько сантиметров и достаточны, чтобы выдержать, вероятно, сотни киловольт длительностью в несколько микросекунд. У нас нет достаточной информации относительно диэлектрических свойств водных растворов гликоля при более длительных импульсах. Однако мы в состоянии сделать некоторые полезные предварительные расчеты. Рассеяние мощности в жидкости составит

$$P = \frac{V_{ch}^2}{R_{liq}}$$

или  $1 \text{ МВт}$  при  $V_{ch} = 1200 \text{ В}$  и  $R_{liq} = 1,44 \text{ Ом}$  (см. результаты испытаний ниже). При непрерывной подаче такая мощность привела бы к кипению раствора, что можно рассматривать как пробой при длительных импульсах. Таким образом, время до пробоя может рассчитать как

$$\tau_{brd} = \frac{c_p m \Delta T}{P}$$

предполагая, что это адиабатический нагрев при постоянном  $R_{liq}$ . Для массы жидкости  $m = 70 \text{ кг}$ ,  $\Delta T = 50 \text{ К}$ ,  $c_p = 3,56 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$  мы рассчитываем результат =  $12 \text{ с}$ . Такая ситуация, хотя она и является чисто гипотетической ввиду необходимости подвода чрезвычайно большого количества мощности для поддержания накопительного конденсатора в заряженном состоянии, предостерегает против соединения, показанного на рис. 1a.

Этиленгликоль очень ядовит. Поэтому в конечном счете в качестве хладагента был выбран пропиленгликоль компании Prestone, разбавленный деионизированной водой в соотношении 50 на 50%. Удельная теплоемкость пропиленгликоля  $2,51 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$  близка к удельной теплоемкости этиленгликоля ( $2,41 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$ ) [8], а в водных растворах 50 на 50%  $c_p = 3,56 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$ , что составляет приблизительно 85% удельной теплоемкости воды. Таким образом, расход может быть значительно ниже, чем для циркуляции масла.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи****ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ**

Авторы благодарят г-на К. Карпа, г-на Р. МакАртура, г-на Дж. ЛаМонтен и г-на Д. Райана из компании Spellman High Voltage Electronics Corporation за неоценимую помощь при разработке и проведении экспериментов.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- [1] A. Pokryvailo, M. Wolf, Y. Yankelevich, S. Wald et al., "High-Power Pulsed Corona for Treatment of Pollutants in Heterogeneous Media", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 34, No. 5, October 2006, pp. 1731–1743.
- [2] P. L. Kalantarov and L. A. Zeitlin, Inductance Calculation, 3rd Ed., Leningrad, EnergoAtomizdat, 1986 (in Russian).
- [3] M. Zahn, Y. Ohki, D. B. Fenneman, R. J. Gripshover, and V. H. Gehman, "Dielectric Properties of Water and Water/Ethylene Glycol Mixtures for Use in Pulsed Power System Design", Proc. IEEE, vol. 74, No. 9, Sept. 1986, pp. 1182–1221.
- [4] Encyclopedia of Chemistry, vol. 5, p. 984. Ed. N. Zefirov, Bolshaya Rossijskaya Enziklopedia, Moscow, 1998 (in Russian).
- [5] J. Liu, X. Cheng, J. Pu, J. Zhang, "Experimental Study of the Electrical Characteristics of Ethylene Glycol/Water Mixtures in the Microsecond Regime", IEEE Electrical Insulation Mag., Nov/Dec 2007—Vol. 23, No. 6, pp. 20-25.
- [6] Impulse Breakdown of Liquids, Ed. V. Y. Ushakov, Springer, 2007, p. 283-284.
- [7] CRC Handbook of Physics and Chemistry, 82nd Ed., Ed. D. R. Lide, CRC Press, 2002.

**3. Результаты проверки**

Длительная работа на полной мощности 52 кВт продемонстрировала, что температура барабанов (измеренная в средней секции с использованием термопар) составила 60–70 °С (в зависимости от температуры окружающей среды и положения теплообменника) при расходе 20 л/мин. Температура окружающей среды в испытательном отсеке поддерживалась холодильной установкой на уровне 23 °С, хотя температура вокруг барабанов была значительно выше. Никаких признаков разрушения резисторов кроме ржавчины на стальных лапках замечено не было; однако хладагент стал непрозрачным и слизистым, а шины также были покрыты шламом. Сопротивление хладагента, измеренное при высоком токе до 3 А с использованием источника питания постоянного тока, изменялось от 9 Ом при 11 °С (свежий раствор, сохраняемый в барабане приблизительно в течение месяца) до 2,8 Ом при 18 °С (выдержанный раствор) и до 1,2 Ом при 54 °С (выдержанный раствор). Это соответствует наблюдаемому увеличению тока на ~10 % в горячих условиях (67 °С) по сравнению с работой при низкой температуре (23 °С — см. рис. 8).

Коррозия под действием внешнего тока, которой можно пренебречь в короткоимпульсных устройствах, представляет собой серьезную проблему в данной области применения и заслуживает тщательного анализа. Однако это выходит за рамки настоящей статьи.

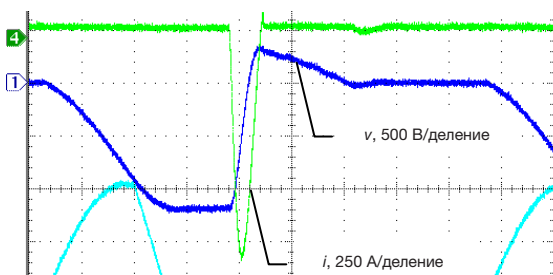


Рис. 8. Напряжение конденсатора и ток нагрузки при 23 °С

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

## Научные статьи

- Электрические измерения напряжения «v» и тока «i» с последующим определением «E» с помощью интегрирования:

$$E = \int_0^T v i dt, \quad (2)$$

где T — период. Потеря мощности определяется как, где  $f = 1/T$ .

Первый метод обеспечивает точные и самые достоверные результаты, но труден в применении, особенно в условиях с воздушным охлаждением. Второй метод проще, но неудобен для макетных установок с постоянно меняющимися схемами охлаждения. Мы остановимся более подробно на третьем методе как самом гибком и понятном для инженеров-электриков.

Уравнение (1) хорошо работает только при точном измерении тока и напряжения. В связи с очень большим динамическим диапазоном напряжений в открытых и закрытых состояниях, трудно разработать универсальную установку, хотя все же имеются рекомендации, как обойти эту проблему [2]. Для этого потребуются высококачественные датчики и хороший осциллограф, однако сами по себе они не гарантируют достоверных измерений. Безопасность обеспечивается с помощью дифференциальных пробников за счет точности измерений, которой приходится жертвовать вследствие их ограниченной полосы частот и емкостных влияний.

При определении потерь переключения первостепенное значение имеет хорошая разрешающая способность по времени, тогда как динамический диапазон не так важен. Для топологий с жестким переключением эти потери можно оценить при помощи технических спецификаций. В цепях с мягким переключением доминируют потери за счет теплопроводности, а потерями переключения можно зачастую пренебречь. Здесь точность измерения напряжения открытого состояния выходит на передний план. Этой проблеме и посвящено следующее изложение материала.

Основной метод сужения динамического диапазона заключается в фиксации напряжения с помощью нелинейных делителей (см., например, [3]). На рис. 1 показаны два примера таких делителей. В варианте применения а используется N низковольтных диодов, подключенных последовательно. Поэтому когда прикладываемое напряжение падает ниже  $NV_{df}$ , где  $V_{df}$  — порог прямой проводимости диода, ток через R1 не проходит, и напряжение на входе осциллографа равняется  $HV_m$ . Аналогично работает и схема б.

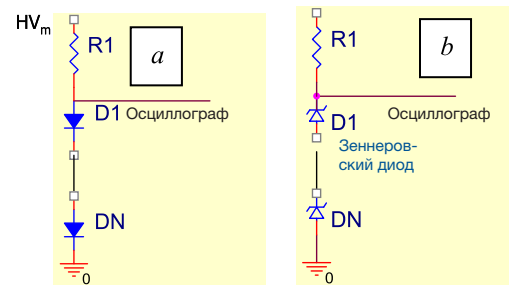


Рис. 1. Схемы базовых нелинейных делителей напряжения

Методики проведения эксперимента и средства измерения описаны далее в основном тексте статьи.

## Точные измерения потерь силовых полупроводниковых приборов в открытом состоянии

Алекс Покривайло и Костел Карп  
Компания Spellman High Voltage Electronics Corporation  
475 Wireless Boulevard Hauppauge, NY 11788

Представлено на 28-м Международном симпозиуме по силовым модуляторам, Лас-Вегас, 27–31 мая, 2008 г., стр. 374–377

### КРАТКИЙ ОБЗОР

Для обеспечения безопасности конструкции температура перехода должна оставаться в рамках указанного диапазона. Для определения потерь мощности чаще всего используются три метода:

- Калориметрический метод.
- Использование калиброванных радиаторов.
- Электрические измерения напряжения и тока на приборе и определение потерь путем интегрирования этих переменных.

Основное внимание в работе уделяется третьему методу с акцентом на точном измерении напряжения на приборе в открытом состоянии. Здесь же обсуждаются методы использования нелинейных делителей с глубокой фиксацией напряжения. Предлагаются новые схемы, позволяющие проводить точные измерения напряжения открытого состояния с хорошей разрешающей способностью по времени переключения переходов. Результаты моделирования схем подтверждаются обширными испытаниями. Приводятся примеры измерения напряжения открытого состояния на больших модулях БТИЗ и шунтирующих диодах (FWD). Полученные результаты применимы при определении характеристик различных силовых переключателей, например, газоразрядных приборов.

### ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения безопасности конструкции переключаемых систем преобразования мощности температура перехода мощных полупроводниковых приборов должна оставаться в рамках заданного диапазона. В практическом методе вычисления этого параметра используются следующие формулы:

$$T_j = T_c + \Delta T_j, \quad \Delta T_j = Q R_{th(j-c)}, \quad (1)$$

где  $T_c$  — температура корпуса, характеризует повышение температуры перехода относительно корпуса прибора, Q — составляющая потери мощности, представляет собой тепловое сопротивление переход — корпус (определяется изготовителем). Все указанные температуры могут быть легко измерены; для определения потерь мощности потребуется больше усилий.

Обычно используются три метода:

- Калориметрический метод (см., например [1]).
- Использование калиброванных радиаторов.

Научные статьи

Емкость зеннеровских диодов (стабилитронов), в отличие от диодов, должна учитываться, и в этом случае постоянная времени составляет порядка микросекунды. Это больше, чем типичное время переключения и соизмеримо с шириной импульса при высокой частоте преобразования. На рис. 2 и рис. 3 проиллюстрировано указанное утверждение. Эксперименты проводились с полумостовым квазирезонансным инвертором. Для контроля токов компонентов использовался пояс Роговского CWT15 [4]. Так как это по существу пробник переменного тока, кривые тока обычно смещены. На рис. 3 видно, что смещение в токе эмиттера было удалено цифровым способом.

УЛУЧШЕННЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

Вредное действие емкости зеннеровского диода (стабилитрона) может быть скорректировано с помощью быстродействующего диода, подключенного последовательно, как показано на рис. 4, на котором моделируется фактическая схема (при этом в качестве зеннеровских диодов (стабилитронов) были использованы 1N751A, а в качестве диода — MMBD914). Имитационные модели на рис. 4 соответствуют измерениям на рис. 5. Можно заметить, что переключение открытого состояния осуществляется быстрее и с меньшим шумом, по сравнению с рис. 3. Это важно для расчета потерь с помощью (2). Следует заметить, что схема, подобная схеме на рис. 4, описывается в [3], но фактические формы сигнала характеризуются медленными переключениями порядка ~2 мкс, что может быть связано с использованием неподходящего диода.

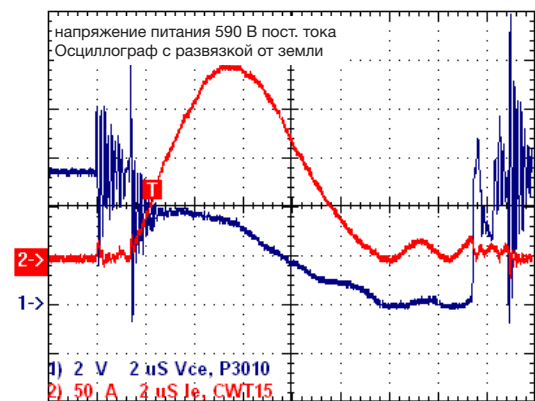


Рис. 3. Измерение напряжения «коллектор — эмиттер» Vce на БТИЗ CM300DC-24NFM Powerex с использованием схемы, приведенной на рис. 2. Осциллограф TDS 3024B изолирован от цепей заземления. На настоящем и других графиках в примечаниях к форме сигнала имеется информация по шкале и типам применяемых пробников

НЕДОСТАТКИ И ОГРАНИЧЕНИЯ БАЗОВЫХ СХЕМ

Схемы на рис. 1 представляют собой идеализированные схемы, или идеальные приборы для измерения низких напряжений в высоком динамическом диапазоне. В действительности существует ряд факторов, ограничивающих применимость этих схем в том виде, как указано на рис. 1. Здесь мы не будем останавливаться на очевидных ограничениях вследствие характеристик компонентов.

Одним из ограничений является инерция, которая вводится постоянной времени измерительного контура, где  $C_p = C_{pr} + C_{pd}$  — емкость входа осциллографа (включая пробник)  $C_{pr}$  параллельно с динамической емкостью диодов/стабилитронов  $C_{pd}$ . Типичная емкость пассивных пробников для измерения напряжения составляет 10 пФ. Таким образом, при  $R_1 = 10$  кОм постоянная времени схемы может быть ~10-7 с, что весьма мало, если емкостью диодов можно пренебречь. Однако диоды остаются в течение некоторого времени смещенными в прямом направлении, после того как напряжение HVm падает ниже порогового значения, так как на них еще не подается никакого обратного напряжения. Это время может составлять приблизительно 1 мкс для диодов с заданным временем восстановления  $t_{rr} = 75$  нс, таких как BYM26E, как было показано во время экспериментов и имитации PSpice. Время перехода диодов в непроводящее состояние составляет ~0,5 мкс, поскольку обратный ток очень мал и не способен быстро удалить накопленный заряд.

Применение сигнальных диодов с  $t_{rr}$  порядка нескольких наносекунд разрешает проблему накопленного заряда, как демонстрируется на моделях с диодами 1N4500 с  $t_{rr} = 6$ . Однако эти и подобные диоды (в экспериментах мы использовали MMBD914,  $t_{rr} = 4$  нс) имеют значительный прямой ток порядка десятков микроампер при десятках вольт, что соответствует падению напряжения на R1 порядка 1 В. Таким образом, для уменьшения этого эффекта необходимо подключить последовательно большое количество диодов с сохранением некоторой неопределенности.

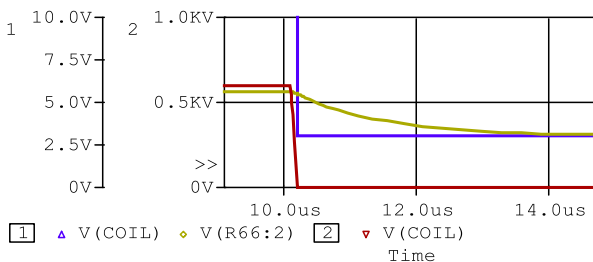
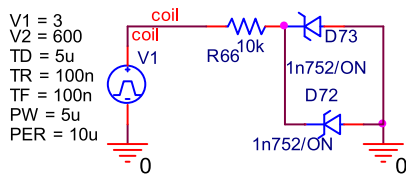


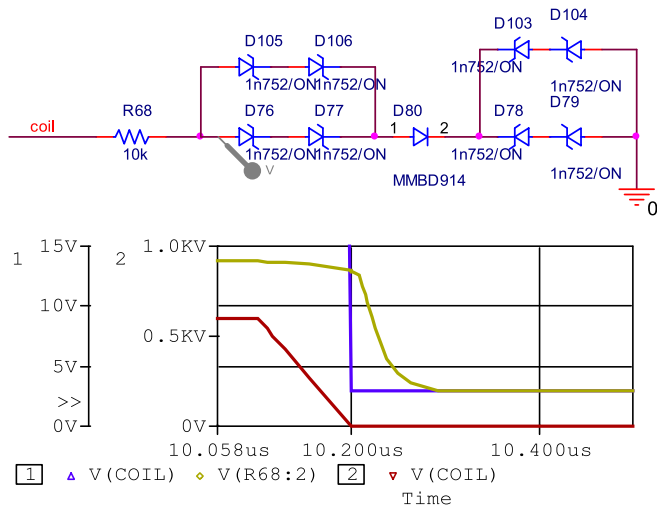
Рис. 2. Моделирование схемы рис. 1b с зеннеровскими диодами (стабилитронами) с помощью программы PSpice.

Псевдонимы .Net на этом и последующих рисунках указывают связи (например, источник V1 связан с точкой «катушка» (coil) схемы на рис. 2)

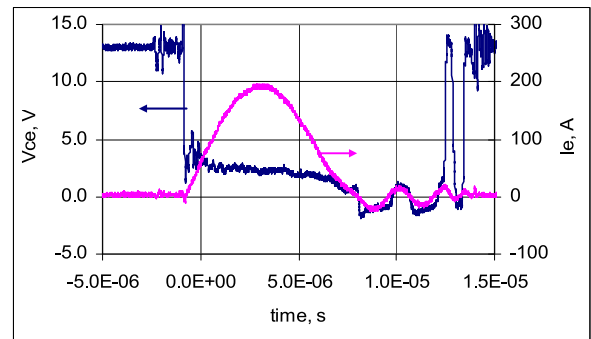
ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

относительно точки HVm. (Без диода отсечки делитель универсален, но переключение в открытое состояние происходит медленно, как показано на рис. 2 и рис. 3.) Для решения этой проблемы можно использовать мост из быстродействующих диодов вокруг зеннеровского диода (стабилитрона) (рис. 7).



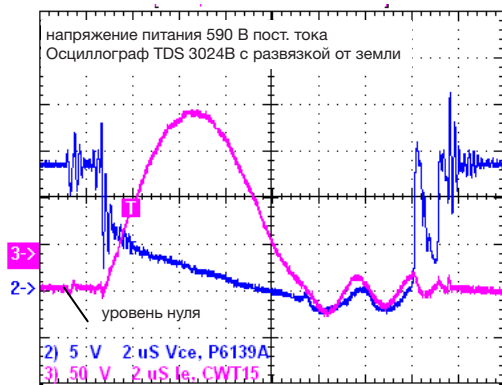
**Рис. 4. Блокирование емкости зеннеровского диода (стабилитрона) с помощью быстродействующего диода.** Возбуждение схемы осуществляется от источника V1 рис. 2



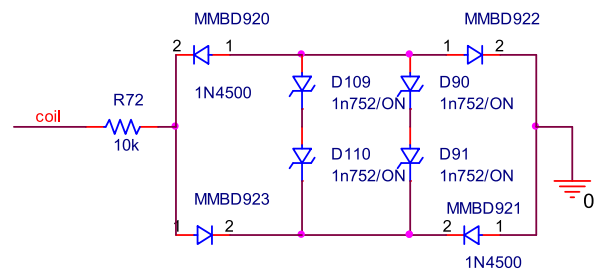
**Рис. 6. Vce, скорректированное по индуктивному падению напряжения (была применена цифровая фильтрация).** Значение соответствует техническим данным на CM300DC-24NFM

Хотя предполагается, что измерения, представленные на рис. 5, являются достоверными в том смысле, что напряжение между точками измерения было зарегистрировано точно, фактическое напряжение Vce отличается от этого значения вследствие внутренней индуктивности БТИЗ с боковой изоляцией IGBT. Индуктивное падение напряжения  $L_{IGBT} \frac{di}{dt}$  может быть вычтено из измеренного напряжения; скорректированная форма сигнала, вычисленная для БТИЗ с боковой изоляцией IGBT = 20 нГн, показана на рис. 6.

На рис. 8 показана кривая тока на шунтирующем диоде IXYS DSEI 2x61 (в один модуль входит два параллельно подключенных диода) вместе с кривой напряжения, замеренной с помощью делителя, изображенного на рис. 4 (без быстродействующего диода), на осциллографе, изолированном от цепи заземления. Кривая напряжения имеет форму почти синусоидальной волны с главным задним фронтом импульса, который представляет собой погрешность измерения, вызванную характерным дефектом этой схемы (емкость зеннеровского диода (стабилитрона)).



**Рис. 5. Измерение напряжения насыщения Vsat (напряжение «коллектор-эмиттер» Vce) на CM300DC-24NFM с использованием схемы на рис. 4.** Осциллограф изолирован от цепей заземления



**Рис. 7. Мост из быстродействующих диодов вокруг зеннеровского диода (стабилитрона) одинаково хорошо подходит для измерения как положительных, так и отрицательных низких напряжений в широком динамическом диапазоне.** Возбуждение схемы осуществляется от источника V1 рис. 2

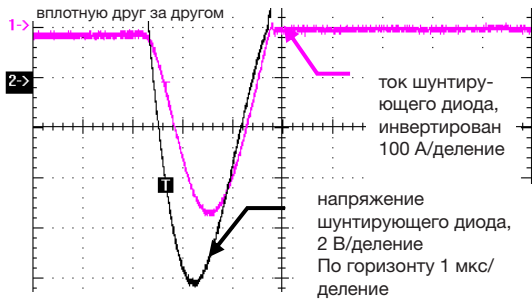
Делитель на рис. 4 (зеннеровские диоды (стабилитроны) со смещением в прямом направлении избыточны) подходит для измерения Vsat силовых транзисторов (и, между прочим, многих других типов переключателей, таких как тринисторы, трансформаторы тока замыкания на землю и газоразрядные приборы), но не может использоваться для измерения падения напряжения в режиме прямого тока шунтирующих диодов (FWD), поскольку полярность на нем отрицательна

Применение делителя рис. 7 обеспечивает уже другую картину. Считается, что он значительно улучшает измерение, как можно видеть на рис. 9, на котором также показана откорректированная форма сигнала и кривые потерь. И опять же фактическое прямое падение напряжения меньше на величину индуктивной составляющей.

**ИЗМЕРЕНИЕ БЕЗ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОСЦИЛЛОГРАФА ИЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ?**

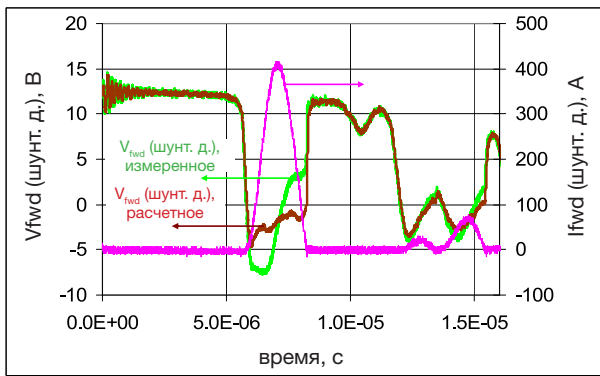
**Обеспечение безопасности**

Как правило, корпус осциллографа заземляется в целях безопасности, а измерения без заземления выполняются дифференциальными датчиками в соответствии с рекомендациями поставщиков осциллографов (см., например, [2]). Однако наш опыт показывает, что качество измерений при этом значительно падает в сравнении с тем случаем, когда для таких целей используется осциллограф, изолированный от заземления вместе с опорной точкой, например, эмиттером транзистора или анодом шунтирующего диода. Примеры использования дифференциального датчика P5200 для измерения  $V_{ce}$  и прямого падения напряжения на шунтирующем диоде показаны на рис. 10 и рис. 11 соответственно.

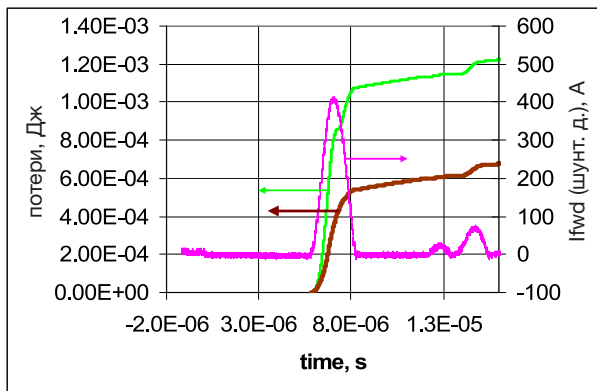


**Рис. 8. Кривая 2 — прямое падение напряжения на шунтирующем диоде IXYS DSEI 2x 61 (отрицательная часть).**

Фиксированное напряжение смещения положительной величины (непроводящий диод) — вне шкалы. Емкость зеннеровского диода (стабилитрона) (делитель на рис. 4) влияет на время падения напряжения



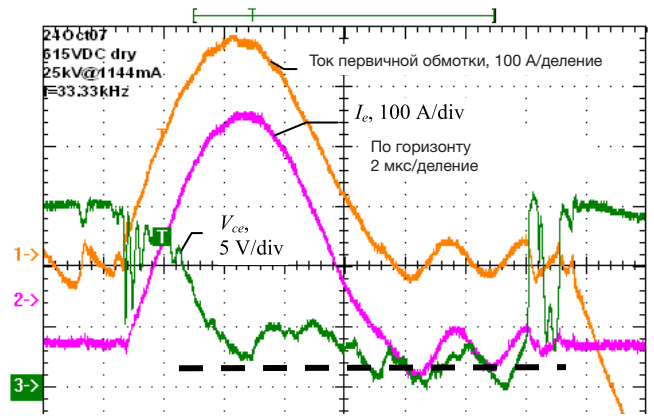
a



b

**Рис. 9. Потери на шунтирующем диоде FWD IXYS DSEI 2x61.**

График а — зеленая кривая — это измеренный сигнал, коричневая кривая —  $V_{fwd}$ , скорректированная по индуктивному падению напряжения  $Ldfwd/dt$  (индуктивность блока диодов оценивается на уровне 5 нГн). Зеленая и коричневая кривая на графике b соответствуют их аналогам на графике а. Делитель рис. 7, осциллограф, изолированный от цепей заземления



**Рис. 10. Дифференциальное измерение  $V_{sat}$  (график 3  $V_{ce}$ ) на БТИЗ CM300DC-24NFM Powerex с применением схемы, показанной на рис. 4. Кривая 3 может иметь некоторое смещение, предполагаемый ноль показан прерывистой линией**

По нашему мнению, они «менее достоверны», чем их аналоги, измеренные приборами, изолированными от цепей заземления, как показано на рис. 5 и рис. 9 (см. также совмещение результатов измерения, полученный дифференциальным методом и методом с изоляцией измерительных приборов от цепей заземления, и рис. 12), что можно объяснить ограниченной полосой частот пробника (25 МГц для P5200 по сравнению с 500 МГц для P6139A), емкостью выводов относительно земли в дополнение к емкости 7 пФ каждого входа (предполагаемая общая индуктивность 30 пФ) и большим колебанием напряжения (~360 В при напряжении питания 600 В) на входах относительно земли. Поэтому в таких случаях предпочтительнее использовать осциллографы с питанием от батареи, такие как Tektronix TPS. А еще более хорошим, универсальным и менее дорогостоящим решением будет использование обычных осциллографов с питанием от источника бесперебойного питания, отключенного от сети питания. При измерениях приборами, изолированными от цепей заземления, необходимо соблюдать обычные правила техники безопасности.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения напряжения открытого состояния переключателей большой мощности рекомендуется применение делителя на рис. 4. Фиксированное напряжение смещения должно быть откорректировано с учетом значения открытого состояния с помощью необходимого количества зеннеровских диодов (стабилитронов). Измерения приборами, изолированными от цепей заземления, обеспечивают более высокую точность, но при этом необходимо строго соблюдать правила техники безопасности.

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Авторы выражают признательность за поддержку настоящей работы, оказанную компанией Spellman High Voltage Electronics Corporation.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] C. Huang, P. Melcher, G. Ferguson and R. Ness, "IGBT and Diode Loss Measurements in Pulsed Power Operating Conditions", Proc. Power Modulator Symposium, 2004, pp. 170–173.
- [2] S. Gupta, Power Measurements and Analysis: Challenges and Solutions, Tektronix White Paper.
- [3] A. Calmels, "VDS(on), VCE(sat) Measurement in a High Voltage, High Frequency System", Advanced Power Technology, Application note APT0407, November 2004.
- [4] [http://www.pemuk.com/pdf/cwt\\_mini\\_0605.pdf](http://www.pemuk.com/pdf/cwt_mini_0605.pdf)

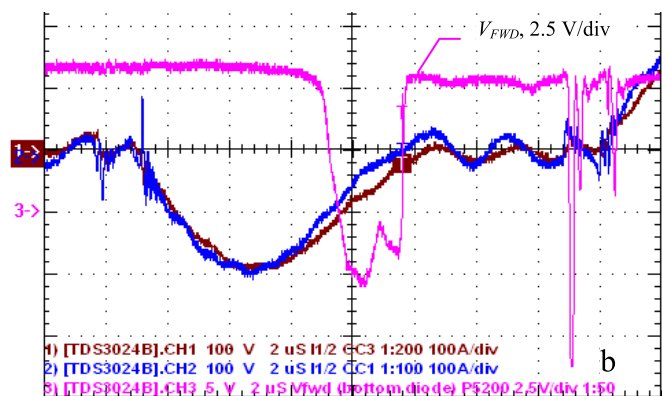
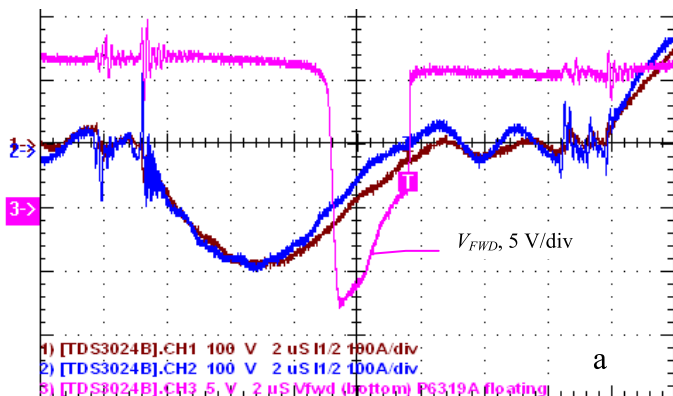


Рис. 11. Кривая 3 — прямое падение напряжения на шунтирующем диоде IXYS DSEI 2x 61.

Два параллельно подключенных модуля.

а — широкополосный пробник P6139A, б — дифференциальный пробник. Оба измерения были проведены с помощью осциллографа, изолированного от цепей заземления

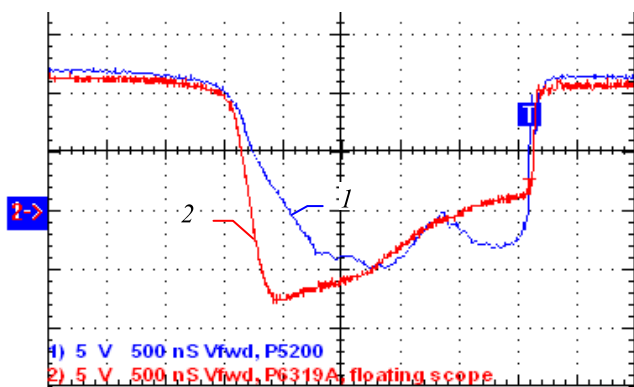


Рис. 12. Совмещение результатов измерения, полученных дифференциальным методом и методом с изоляцией измерительных приборов от цепей заземления на рис. 11 а, б



## Высокоэффективный источник питания с режимом переключения 100 кВ, 100 кВт для электростатических фильтров (ЭФ)

Алекс Покрываило, Костел Карп и Клифф Скейпелатти  
Компания Spellman High Voltage Electronics Corporation  
475 Wireless Boulevard Hauppauge, NY 11788  
Email: Apokryva@spellmanhv.com

Материал представлен на 11-й Международной конференции по электростатическим фильтрам, Ханчжоу, 21–24 октября, 2008 г., стр. 284–288

### КРАТКИЙ ОБЗОР

В течение почти столетия электростатические фильтры (ЭФ) приводились в действие трансформаторными выпрямительными агрегатами, работающими на частоте сети. Последнее десятилетие в отрасли было отмечено все более широким распространением высокочастотных ВВ источников питания (ВВИП), обеспечивающих значительный экономический эффект.

В настоящей статье описывается новая концепция и приводится физическая демонстрация компактного и недорогого ВВИП с очень высоким КПД, специально предназначенного для применения с ЭФ и в аналогичных областях. Предлагаемая ключевая технология построена на основе модульного высоковольтного преобразователя с энергодозирующими инверторами, которые работают на частоте выше 50 кГц и продемонстрировали КПД 97,5 % в широком диапазоне рабочих условий. Выходные напряжения инверторов сдвинуты по фазе, что обеспечивает исключительно низкие пульсации на уровне 1 % и высокую скорость нарастания выходного напряжения 3 кВ/мкс в сочетании с низким накоплением энергии. Модульная конструкция позволяет легко адаптировать ВВИП под конкретные потребности. Вследствие высокой производительности компактность устройства достигается без применения жидкостного охлаждения. Элементы управления обеспечивают стандартные рабочие функции и современные возможности цифровой обработки, наряду с легкостью адаптации под конкретные требования.

В статье подробно описываются конструкция и испытание ВВИП. Формы сигналов тока и напряжения, полученные в ходе эксперимента, указывают на переключение изменяющейся в широких пределах нагрузки в полном диапазоне входных напряжений сети фактически без потерь и полное соответствие с результатами моделирования. Калориметрическое измерение потерь указывает на КПД > 98,5 % в высоковольтной части. Полный КПД составляет 95 % с полной нагрузкой и более 90 % при 20%-ой нагрузке с коэффициентом мощности, как правило, более 93 %.

### Ключевые слова

Электростатический фильтр (ЭФ), блоки питания ЭФ, высокочастотные блоки питания, умножитель напряжения.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Научные статьи

#### ВВЕДЕНИЕ

В течение почти столетия электростатические фильтры (ЭФ) приводились в действие трансформаторными выпрямительными агрегатами, работающими на частоте сети. Последнее десятилетие в отрасли было отмечено все более широким распространением высокочастотных ВВ источников питания (ВВИП), обеспечивающих значительный экономический эффект от их применения благодаря компактности, низкой пульсации, высокому быстродействию и т. д. при повышенной степени улавливания электростатических фильтров. Хорошие обзоры предоставлены в [1], [2]. В этих обзорах отмечается, что лидирующие позиции на рынке занимают компании Alstom и NWL с сотнями введенных в эксплуатацию устройств. Среди других разработок следует отметить работы Applied Plasma Physics [3], Genvolt [4] и VEI [5].

Высокая частота преобразования, обычно 20–25 кГц, позволяет уменьшить размер. Как отмечено в [2], высоковольтный трансформатор компании Alstom SIR весит приблизительно 9,9 кг, что составляет 1/15 от этого веса для источника питания, работающего на частоте 60 Гц. Вес других пассивных элементов также соответственно уменьшился.

Один из главных вопросов надежности — регулирование теплообмена. Эта задача решается с помощью воздушного (NWL) или жидкостного охлаждения (Alstom). Следует отметить, что схемы воздушного охлаждения оказываются более предпочтительными в этой сфере промышленности. Для реализации высокого КПД и во избежание коммутационных потерь в части преобразователя вышеупомянутого ВВИП почти повсеместно используется резонанс напряжений. Теория и практика таких преобразователей хорошо известна [6], [7]. Естественный способ регулирования напряжения/тока, используемый в таких преобразователях, заключается в регулировании частоты. Акустический шум не представляет собой проблему для ЭФ и подобных применений.

В настоящей статье описывается новая концепция и приводится физическая демонстрация компактного и недорогого ВВИП с очень высоким КПД, специально предназначенного для применения с ЭФ и в аналогичных областях.

#### ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

1. Средняя выходная мощность 100 кВт в диапазоне выходного напряжения 90–100 кВ; с ухудшением характеристик при низком напряжении.
2. Высокочастотная составляющая пульсаций 1 % обычно при 100 кВ, при полной мощности.
3. Динамическая характеристика: скорость нарастания напряжения 100 кВ/мс мин (от 5 до 95 % от предварительно заданного напряжения). Обычно 300 кВ/мс.
4. Накопленная энергия на выходе: < 10 Дж.
5. Частота преобразования 50 кГц.
6. Входное напряжение: три фазы 400 В перем. тока +10%, -14%.
7. Энергетический КПД: как правило, > 95 % при полной мощности 100 кВ, > 90 % при 20 кВт.
8. Коэффициент мощности: > 93 % на полной мощности при 100 кВ, > 75 % при 20 кВт.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

9. Стойкость к возникновению искры/дуги.
10. Общий вес 250 кг, подлежит определению; высоковольтный блок 109 кг (240 фунтов); объем масла менее 60 л.

**КЛЮЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ**

ВВИП построен вокруг модульного высоковольтного конвертера (рис. 1). Питание на все модули конвертера M1-MN подается с общего входного выпрямителя (ВВ). В состав модулей входит инвертор INV1-INVN, подающий питание на трансформаторы HV T1-TN, которые, в свою очередь, подают питание на умножители напряжения R1-RN. Эти напряжения суммируются на соответствующих выходах по постоянному току. Такую топологию можно назвать «сумматором индуктивности». Для 100 кВ, 100 кВт номинальный параметр N = 4. Каждый модуль рассчитан на среднюю мощность 25 кВт и напряжение 25 кВ и должен иметь высоковольтную изоляцию вторичной обмотки трансформатора, рассчитанную на 3x25 кВ = 75 кВ пост. тока. Эта изоляция должна также выдерживать напряжения переходных процессов, возникающие при включении и выключении ВВИП. Количество таких переходных процессов определяется рабочим сценарием ВВИП и, главным образом, интенсивностью искрения.

Топология, представленная на рис. 1, была давно исследована. Она позволяет уменьшить количество умножительных каскадов и номинальное напряжение высоковольтного трансформатора. Первый фактор улучшает коэффициент уплотнения и коренным образом уменьшает аккумулированную энергию. Сдвиг фаз по напряжению на выходах инверторов приводит к уменьшению пульсаций на выходе и дополнительному уменьшению накапливаемой энергии. При этом методе затраты ресурсов и времени на разработку сокращаются, поскольку после разработки одного модуля (включая его основную изоляцию) вся система реализуется как простая комбинация нужного количества модулей. К издержкам относится большее количество деталей и необходимость высоковольтной изоляции, которая не требуется в традиционных умножителях Cockroft-Walton. Однако эта изоляция подвергается главным образом воздействию напряжений постоянного тока и поэтому изнашивается намного медленнее, чем в случае с напряжением переменного тока.

Ячейки преобразователя размещаются вокруг квазирезонансных энергодозировующих инверторов, выполненных по полумостовой схеме, (рис. 2) [10], [11], [12]. Принципы действия и теория были изложены в [11]. В нормальном режиме один из конденсаторов делителя Cdiv заряжается до напряжения питания. При замыкании соответствующего переключателя он разряжается через первичную обмотку, в то время как его аналог заряжается до напряжения питания. Если в токовой цепи имеется индуктивность, то формируется сигнал синусоидальной формы, и в идеальном случае вся энергия накопленная в Cdiv, будет передаваться на сторону вторичной обмотки. Если Cdiv полностью разряжен, а ток не падает до нуля, то шунтирующие диоды (ШД) ограничивают ток через конденсаторы, предотвращая перемену полярности. Таким образом, остаточная энергия, накопленная в катушке индуктивности, передается на выход (см. рис. 4).

Преимущества этой топологии заключаются в жестком управлении передачей энергии, внутреннем ограничении тока короткого замыкания и напряжений на компонентах преобразователя.

Максимальная частота, при которой возможна работа с пересечением точки нулевого тока, в нормализованной форме определяется по уравнению

$$f_N = \frac{1}{\frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{2} a \cos\left(\frac{V_l}{V_l - E}\right) + \frac{E}{2V_l} \sqrt{1 - \frac{2V_l}{E}} \right]} \quad (*)$$

где E — напряжение питания, причем как напряжение питания, так и напряжение нагрузки V<sub>l</sub> относятся к той же самой стороне трансформатора. Частота преобразования f нормализуется по резонансной частоте f<sub>0</sub> контура, образованного индуктивностью рассеяния и резонансными контурами из трубчатых конденсаторов:  $f_N = f/f_0$ .

Образец графика по этому уравнению показан на рис. 3. Следует заметить, что реальная частота преобразования несколько ниже, чтобы обеспечивать время затухания ~1,5 мкс.

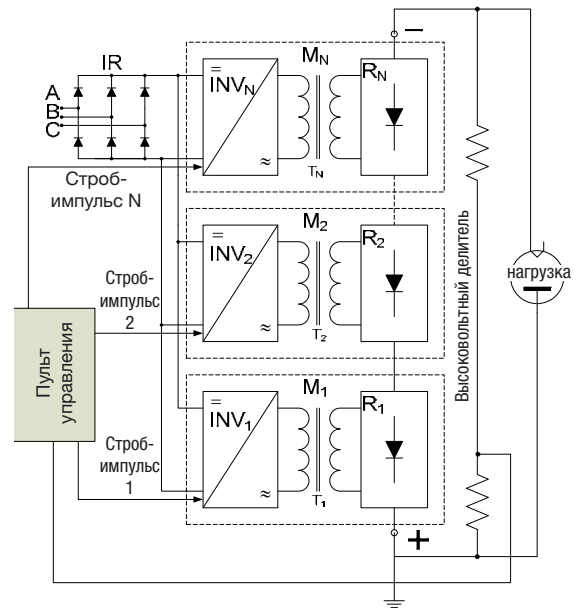


Рис. 1. Блок-схема ВВИП

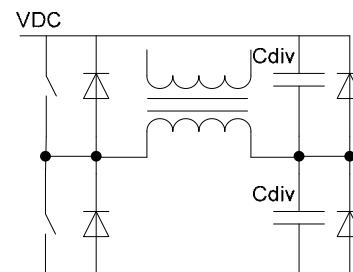


Рис. 2. Инвертор с энергодозировующими конденсаторами

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

Инверторы работают на частоте приблизительно 50 кГц с полной нагрузкой фактически с нулевыми коммутационными потерями. Индуктивность рассеяния высоковольтных трансформаторов полностью интегрирована в параллельные резонансные контуры. Таким образом, необходимость во внешних катушках индуктивности отпадает. Помимо уменьшения количества деталей и стоимости это свойство очень полезно для выбранной многоэлементной резонансной топологии, поскольку индуктивность рассеяния повторяется от выборки к выборке и не зависит от температуры. Элементы управления обеспечивают стандартные рабочие функции и современные возможности цифровой обработки наряду с легкостью адаптации под конкретные требования. Регулирование выхода осуществляется путем регулирования частоты.

Особое внимание уделялось определению потерь на высоковольтном трансформаторе и умножителе. Этот фактор учитывался как ключевой при разработке высоковольтного бака. С этой целью были проведены calorиметрические измерения потерь. В результате были получены данные по потерям — 344 Вт, из них 175 Вт приходится на потери на трансформаторе, а остальная часть — потери на умножителе. Таким образом, ожидалось, что КПД высоковольтной части составит > 98,5 %. С учетом потерь на инверторе КПД преобразователя оценивался на уровне 97,5 %, а полный КПД по всему ВВИГ прогнозировался на уровне 95 %. Ввиду ожидаемой высокой производительности было решено использовать воздушную схему охлаждения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Единичный модуль

Типичные формы сигнала, которые показаны на рис. 4 (зафиксированные при номинальном напряжении сети), указывают на хорошее резонансное переключение без сквозных токов во всем диапазоне входных напряжений сети, и полное соответствие с результатами имитационного моделирования PSpice. Первичная обмотка была разделена на две секции, подключенные параллельно. Причем каждая секция коммутировала группу транзисторов. Отсюда происходит обозначение halved («разделенная пополам») в заголовке рисунка. Пунктирной линией показано начало проводимости на шунтирующем диоде. При низком напряжении в линии шунтирующие диоды не проводят ток, и преобразователь работает в граничном режиме, который задается (\*). Эти измерения были проведены с помощью БТИЗ CM300DC-24NFM компании Powerex. Потери мощности были оценены при 50 Вт на транзистор (четыре транзистора, или 800 Вт на модуль преобразователя), а теплота легко отводилась с помощью радиаторов воздушного охлаждения с превышением температуры относительно окружающей среды менее чем на 40 °С. Методы измерения потерь мощности описываются в [13].

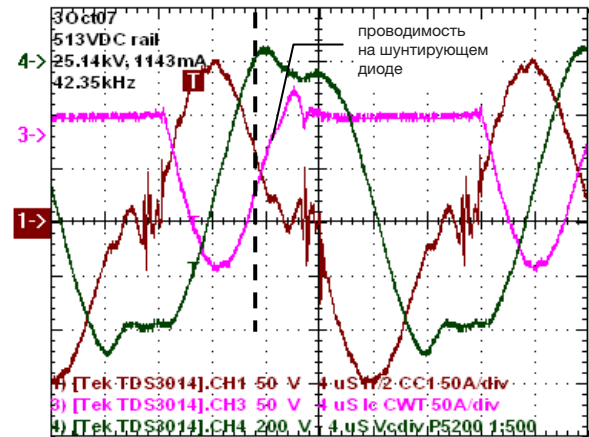


Рис. 4. Номинальное напряжение сети. P = 28,7 кВт; кривая 1 — первичная обмотка тока (половинное значение); кривая 3 — ток коллектора (половинное значение); кривая 4 — напряжение на резонансном контуре из трубчатых конденсаторов. Проводимость на шунтирующем диоде справа от прерывистой линии

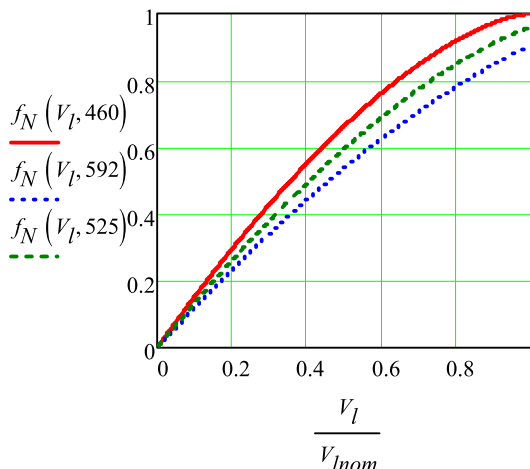


Рис. 3. Кривые ZCS (с пересечением точки нулевого тока) для низкого (460 В), высокого (592 В) и номинального (525 В) напряжения питания постоянного тока. V<sub>lnom</sub> — номинальное напряжение на нагрузке



Рис. 5. Лабораторный ВВИП

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

Испытания ВВИП

Лабораторный ВВИП был собран на тележке, как показано на рис. 5. Он состоит из трех основных блоков: линейный выпрямитель, защищенный автоматическим выключателем; секция инвертора и заполненный маслом высоковольтный бак. Следует отметить, что в этой работе основное внимание уделялось преобразователю; линейный выпрямитель не был оптимизирован.

ВВИП прошел многочисленные испытания с использованием активных нагрузок. На рис. 6 и 7 показаны типичные токи на первичных обмотках (половинные значения) со сдвигом по фазе для мощности 50 кВт и 100 кВт соответственно. Колебания после основного выброса тока генерируются резонансом между индуктивностью рассеяния и паразитной емкостью трансформаторов. Обратите внимание на отсутствие импульсной характеристики тока «обратный выброс импульса» для параллельно подключенных резонансных схем при небольшой нагрузке.

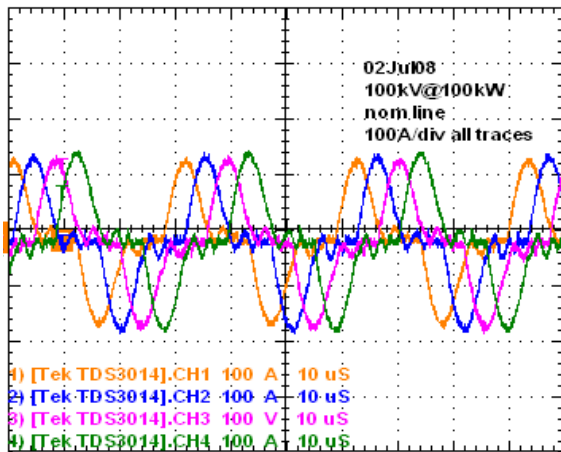


Рис. 6. Токи первичной обмотки (половинное значение) со смещением фаз  $\pi/4$  при 100 кВ и 100 кВт. Номинальное напряжение сети — 400 В перем. тока

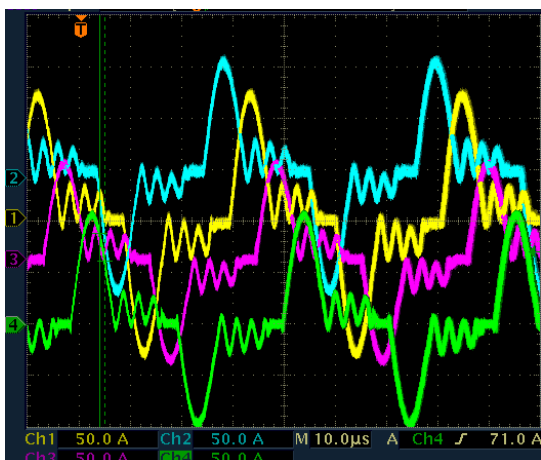


Рис. 7. То же самое, что и на рис. 6 при 100 кВ и 50 кВт. Низкое напряжение в линии 400 В перем. тока — 14% (345 В перем. тока)

Поскольку здесь используется схема двухполупериодного выпрямления, сдвиг фаз составляет  $\pi/4$ . По расчетам PSpice, пульсация с полной амплитудой (p-p) в худшем случае с высоким напряжением в линии составит 0,223% выходного напряжения с емкостью ударной нагрузки ВВИП < 2 нФ (рис. 8). Измеренная пульсация примерно в четыре раза выше и имеет более низкую по частоте основную составляющую (рис. 9), что может быть следствием асимметрии стробирующих сигналов, неравных паразитных емкостей, разбросом данных обмотки и т. д. Подобный эффект наблюдался в [9]. В ходе этих модельных экспериментов было определено также значение коэффициента мощности (PF), равное 0,943, что близко к экспериментальным результатам.

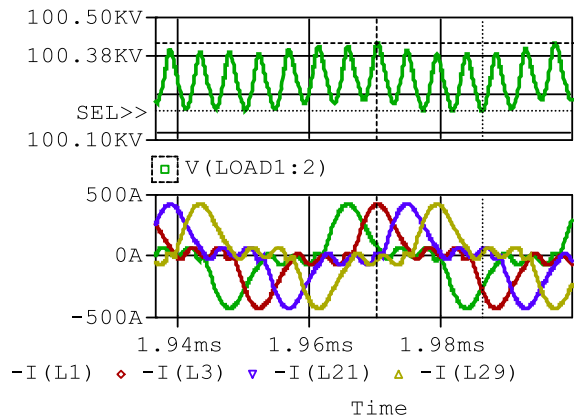


Рис. 8. Моделирование схемы ВВИП. Верхняя линия 580 В. Пульсация 0,223% полной амплитуды. Коэфф. мощности PF = 0,943. Экспериментальное значение PF = 0,946 (см. рис. 11)

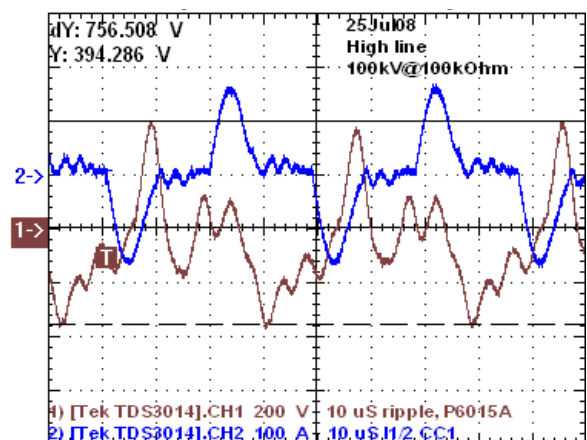


Рис. 9. Пульсация при 100 кВ на нагрузке 100 кОм составляет 0,762% полной амплитуды

Динамическая характеристика ВВИП отличается исключительно высоким быстродействием: время нарастания от нуля до полного выходного напряжения, как правило, менее 250 мкс (рис. 10) в зависимости от напряжения в линии. Динамические характеристики могут быть проанализированы с большой точностью, используя следующее уравнение:

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

$$V_f(t) := 2 \cdot V_{rail} \sqrt{\frac{C_{div}}{C_s} \cdot f \cdot t}$$

где все переменные и параметры приводятся к одной и той же стороне трансформатора; Cs — полная емкость умножителя модуля. При изменении частоты во время заряда имитационные модели PSpice обеспечивают намного более высокую точность.

Высокое быстродействие полезно не только для ЭФ, но также и для медицинских применений. Необходимо отметить, что время нарастания фактически не зависит от нагрузки, поскольку ток нагрузки на порядок меньше, чем ток, заряжающий конденсаторы умножителя.

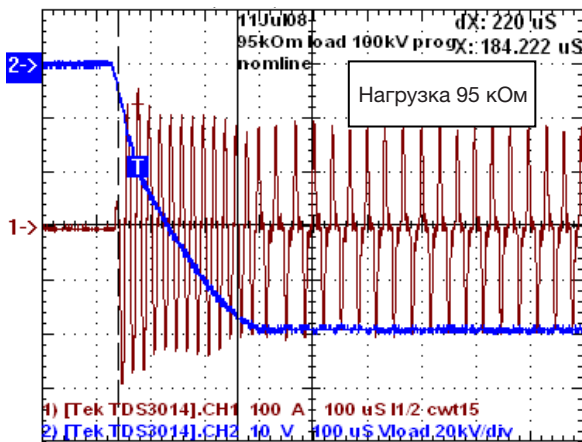


Рис. 10. Время нарастания напряжения на нагрузке 95 кОм при номинальном напряжении сети.

Кривая 2 — напряжение на нагрузке, 20 кВ/деление; кривая 1 — ток первичной обмотки (половинное значение), 100 А/деление

На рис. 11 представлены экспериментальные данные по измерению мощности, полученные при номинальном напряжении сети. В соответствии с имитационными моделями и информацией, полученной на основании работы с единственным модулем, полный КПД составляет 95 % при полной нагрузке и более 90 % при 20%-й нагрузке. Коэффициент мощности был также удовлетворительно высоким (сравните с имитационной моделью на рис. 8). При высоком и низком напряжении сети измерения показали очень близкие результаты. При нагрузке с более высоким сопротивлением КПД и коэффициент мощности (PF) также оставались высокими (рис. 12).

Во время написания настоящей статьи были выполнены длительные прогоны при 100 кВ с мощностью до уровня 75 кВт. Испытания при полной мощности были ограничены ~40 мин. Они продемонстрировали умеренный перегрев основных компонентов ВВИП. Для номинального напряжения сети результаты представлены в итоговой таблице 1.

Таблица 1. Перегрев основных компонентов ВВИП, °С

Мощность на нагрузке, кВт	Основание транзистора	Основание шунтирующего диода	Высоковольтный бак
75	20	18	27
100	25	23	не используется

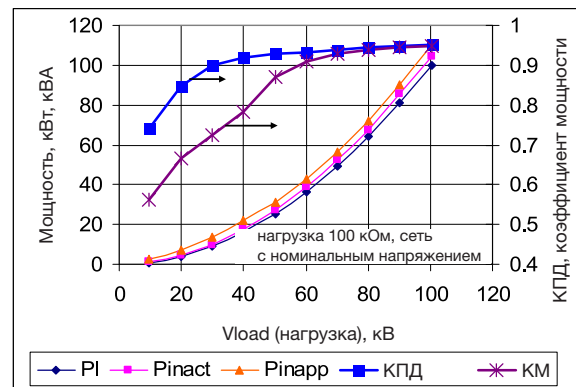


Рис. 11. Кажущиеся значения Pinapp и активная входная мощность Pinact, мощность, поглощаемая нагрузкой, PI, КПД и коэффициент мощности (PF) при номинальном напряжении для нагрузки 100 кОм

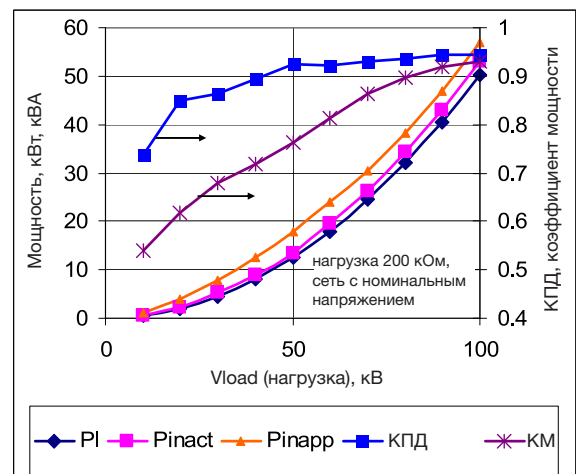


Рис. 12. То же самое, что и на рис. 11 для нагрузки 200 кОм

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Авторы благодарят своих коллег из компании Spellman High Voltage Electronics Corporation за широкую поддержку при проведении этой работы и особенно г-на А. Липовича за его вклад при разработке механической конструкции и г-на А. Сильверберга за реализацию алгоритма фазового сдвига.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКЕ**

**Научные статьи**

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. K. Parker, "Electrical Operation of Electrostatic Precipitators", IEE, London, 2003, 270pp.
2. Advanced Electrostatic Precipitator (ESP) Power Supplies Update: The State-of-the-Art of High-Frequency Power Supplies. EPRI, Palo Alto, CA: 2006. 1010361.
3. M. K. Kazimierczuk, D. Czarkowski, "Resonant Power Converters", Wiley, NY, 1995.
4. R. Erickson and D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics" (Second Edition), Springer, NY, 2001, 912pp.
5. US Patent 4,137,039, "X-Ray Diagnostic Generator", Feb. 23, 1982.
6. Yu. Petrov and A. Pokryvailo, "HV DC-to-DC Converter", Pribory i Tekhnika Experimenta, v.2, pp. 141–143, 1986, Translation to English Plenum Publishing Corp.
7. B. D. Bedford and R.G. Hoft, "Principles of Inverter Circuits", Wiley, NY, 1964.
8. B. Kurchik, A. Pokryvailo and A. Schwarz, "HV Converter for Capacitor Charging", Pribory i Tekhnika Experimenta, No. 4, pp. 121–124, 1990, Translation to English Plenum Publishing Corp.
9. M. Wolf and A. Pokryvailo, "High Voltage Resonant Modular Capacitor Charger Systems with Energy Dosage", Proc. 15th IEEE Int. Conf. on Pulsed Power, Monterey CA, 13–17 June, 2005, pp. 1029–1032.
10. A. Pokryvailo and C. Carp, "Accurate Measurement of on-State Losses of Power Semiconductors", 28th Int. Power Modulators Symp., Las Vegas, 27–31 May, 2008.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи****Концепция и разработка высоковольтного высокопроизводительного недорогого устройства для зарядки конденсаторов<sup>1</sup>**

Алекс Покрываило (Alex Pokryvailo), старший член ИИЭР, Костел Карп (Costel Carp), член ИИЭР и Клифф Скапеллати (Cliff Scapellati), член ИИЭР

**Аннотация.** Приведено описание 10-киловольтного 20-киловаттного устройства для зарядки конденсаторов с частотой повторения 1 кГц. Задачей разработки являлось сочетание высокого КПД и надежности вместе с недорогой конструкцией и хорошей технологичностью. Задача решена путем применения топологии инвертора с дозированной подачей энергии вместе с интеллектуальными средствами управления, подстраивающими частоту переключения с целью обеспечения мягкого переключения для всех возможных случаев применения, с поддержанием максимального коэффициента заполнения для высокой мощности. Переключение выполняется на частоте до 55 кГц с использованием обладающих сравнительно небольшим быстродействием биполярных транзисторов с изолированным затвором с небольшими диэлектрическими потерями на электропроводность. Высокий КПД позволяет использовать конструкцию с полностью воздушным охлаждением, которую можно устанавливать в стойку 19" × 10" × 24". Дан обзор рекомендаций для проектирования. С помощью программы PSpice разработаны всесторонние модели с учетом многочисленных паразитных параметров и имитацией управляющих воздействий для изменения частоты, представлены результаты моделирования. Выполнен анализ повторяемости для самых неблагоприятных условий. С помощью моделей PSpice и средств анализа получена прогностическая повторяемость импульсов 0,3%; измеренные численные значения составляют 0,8% и 1% для кратковременной и продолжительной работы соответственно, при пиковых скоростях заряда и частотах повторения. Представлены типичные осциллограммы тока и напряжения и результаты теплового убегания.

**Ключевые слова:** зарядка конденсатора, регулирование мощности, силовая электроника, импульсная мощность, повторяемость импульсов (PPR).

**I. ВВЕДЕНИЕ**

Устройства для зарядки КОНДЕНСАТОРОВ имеют широкое применение в промышленности, науке, и здравоохранении. Список применений, связанных с импульсной мощностью, весьма велик и постоянно расширяется; читатель может обратиться к соответствующим источникам [1], [2].

<sup>1</sup> Рукопись получена 14.09.2009 г.; переработана 14.03.2010 г.; принята 27.05.2010 г., Дата публикации 13.09.2010 г.; дата текущей версии 08.10.2010 г.

Авторы являются сотрудниками компании Electronics Corporation, Hauppauge, NY 11788 USA (эл. почта: Apokryva@spellmanhv.com). Цветные версии одного или нескольких рисунков из этой статьи доступны по ссылке <http://ieeexplore.ieee.org>.

Идентификатор цифрового объекта 10.1109/TPS.2010.2051959

Для зарядки конденсаторов почти повсеместно применяются импульсные источники питания, заменившие линейные источники питания. Для скоростей зарядки выше нескольких кДж/с преобладающее применение находят топологии с мягким переключением [3]–[9], по меньшей мере, в коммерческой продукции (см., например, статьи в General Atomics [3] и Lambda [4]). Похоже, что в этой нише превалирует последовательно-резонансная топология. Построенные по этой топологии источники питания действуют как источники тока постоянного значения и как таковые являются предпочтительными для ограничения пускового тока и защиты нагрузки. При постоянном значении тока напряжение зарядки возрастает линейно и, следовательно, мощность зарядки является линейной функцией времени.

Среди многочисленных применений наибольшие затруднения вызывает комбинация высокого напряжения, высокой скорости зарядки (десятки кДж/с и выше), высокой частоты повторения импульсов (PPR), компактности, высокого КПД и хорошей повторяемости импульсов (PPR). Наложение ограничений для стоимости и хорошей технологичности делает разработку зарядного устройства еще более сложной задачей. Эти ограничения исключают использование дорогостоящих заказных компонентов, быстродействующих переключателей (например, широкодиапазонных устройств или сборок быстродействующих полевых МОП-транзисторов), экзотических схем и материалов для охлаждения (тепловых труб, фторуглеродных низкокипящих жидкостей, полимеров с нанонаполнителями), оставляя относительно меньше степеней свободы, таких как выбор правильной схемотехнической топологии и стратегии регулирования для увеличения частоты переключения с целью сокращения размеров и улучшения PPR.

PPR, обозначаемый дальше как R, является важным параметром при зарядке конденсатора. Он влияет на стабильность различных физических процессов, от излучения когерентного света до импульсного микроволнового и рентгеновского излучения в применениях в области химии плазмы.

PPR можно определить как

$$R = \frac{V_{C\max} - V_{C\min}}{V_{C\text{avg}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $V_{C\max}$ ,  $V_{C\min}$  и  $V_{C\text{avg}}$  — максимальное, минимальное, и среднее значения напряжения на накопительном конденсаторе  $C_s$  для партии импульсов.

Обычно при зарядке не задействуются алгоритмы прогнозирования. Это значит, что при достижении программного значения выходного напряжения инвертор выключается. В этот момент некоторые компоненты преобразователя, например, индуктивность рассеяния высоковольтного трансформатора, запасают остаточную энергию  $E_{\text{rem}}$ , которая пропорциональна частям энергии, передаваемой в  $C_s$  за каждый цикл. Затем возможно перерегулирование на выходе вследствие частичного или полного перетекания  $E_{\text{rem}}$  в накопительный конденсатор. Это один из главных факторов, ухудшающих PPR. Фактически это, похоже, единственный рассматриваемый в литературе фактор. Казалось

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

бы, можно легко оценить повторяемость при допущении, что вся эта энергия может быть передана в  $C_s$ ; тогда  $R$  будет пропорциональна  $E_{rem}$ . Точнее, ее можно получить с помощью формулы (см. приложение)

$$R = \left( \sqrt{1 + \frac{E_{rem}}{E_c}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $E_c$  энергия, накапливаемая  $C_s$ . В указаниях по применению ALE [10] и General Atomics [4], [11] приведены подобные упрощенные оценки. В практике научного эксперимента принято устанавливать значение напряжения зарядки, равное доле номинального напряжения зарядного устройства и (или) заряжать небольшие конденсаторы. В таком случае зарядка может завершаться даже меньше чем за полупериод частоты преобразования [см. рис. 7 и 15(a)], а это значит, что  $E_{rem}$  соизмерима с  $E_c$ . Допуская  $E_{rem} = E_c$ , получаем  $R = 41,4\%$ . Если достижение максимального напряжения зарядки занимает два периода, можно допустить, что  $E_{rem} = 0,25 E_c$ , что дает  $R = 11,8\%$  (см. рис. 20); в действительности повторяемость может быть и не такой плохой.

Таблица 1. Основные технические характеристики

Входное напряжение	400 В пер. или 480 В пер. <sup>+10%</sup> / <sub>-14%</sub> , 3Ф 50/60 Гц, 4-проводн., частота $\pm 2\%$
Выходное напряжение	от 0 до 10 кВ
Средняя скорость зарядки	20 кДж/с
Частота повторения импульсов (PPR)	Одиночные до 1 кГц
КПД	>92 % при полной скорости зарядки, >85 % при 30 % от номинальной мощности
Коэффициент мощности	>0,93 при полной скорости зарядки >0,85 при 30 % от номинальной мощности
Повторяемость импульсов	Лучше 1 % при 1 кГц и 10 кВ, установившаяся Лучше 0,8 % при 1 кГц и 10 кВ, кратковременная Лучше 2 % при 1 кГц и 2 кВ — 10 кВ, кратковременная.
Изоляция	Воздух, 10 кВ и ниже
Размер	Установка в стойке 10 1/2" (6U) В × 19" Ш × 24" Г
Масса	90 фунтов (41 кг)
Охлаждение	Воздушное

Много усилий было направлено на улучшение PPR, особенно при высокой PPR. Общий подход уменьшает скорость зарядки на порядок или около того по мере приближения к концу зарядки (EOC). Поэтому переносимые за каждый период дозы зарядки («ковши» по терминологии [4], [10]) меньше, и подачи энергии в накопительный конденсатор управлять труднее. Этот метод в различных реализациях используется в промышленной продукции (см., например, [3], [4], [12]). Недостаток такого подхода заключается в завышении мощности зарядного устройства, поскольку основная часть высокоэнергетической зарядки происходит с низким коэффициентом заполнения, зарядка небольшими порциями отнимает 10–30 % цикла зарядки [3].

В этой статье описаны разработка и испытание высокоэнергетического зарядного устройства, удовлетворяющего вышеизложенным противоречивым требованиям в рамках ограниченной недорогой проверенной технологии. Основное внимание сосредоточено на теоретическом и экспериментальном исследовании PPR. Последняя в этой статье рассмотрена только для основной зарядки.

II. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Этот раздел представлен в Таблице I существенными свойствами и наиболее важными техническими параметрами разработанного зарядного устройства.

III. КОНСТРУКЦИЯ

Структурная схема зарядного устройства показана на рис. 1. Зарядное устройство состоит из трехфазного входного выпрямителя с прерывателем, средств мягкого пуска и сглаживающего фильтра, модуля преобразователя (CM), и высоковольтного делителя и средств управления. Запускаемое внешним источником зарядное устройство заряжает конденсатор  $C_s$ , который разряжается на эквиваленте нагрузки через высоковольтный переключатель DSw. Ограничивающие катушки индуктивности и (или) резисторы можно добавлять при необходимости.

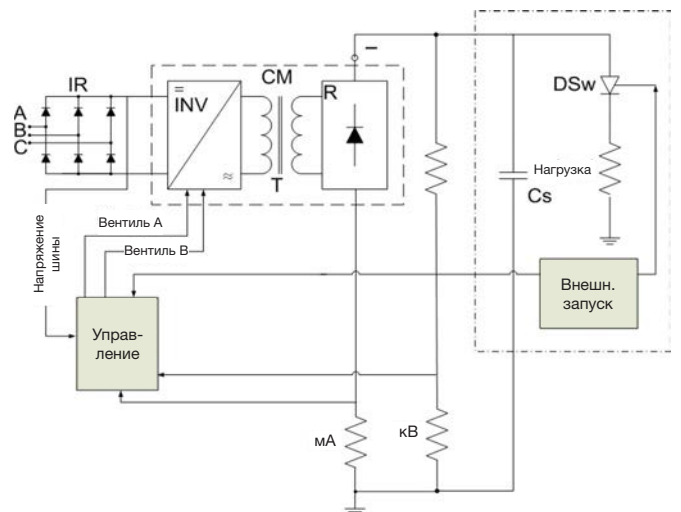


Рис 1. Структурная схема зарядного устройства

CM состоит из инвертора INV, высоковольтного трансформатора с обмотками на популярных ферритах U100/57/25 и выпрямителя R. Основу CM представляет полумостовой квазирезонансный инвертор с конденсаторами дозирования энергии (рис. 2) [14]–[16]. В работе [15] изложен принцип действия и теория работы (ее материал частично повторен, избавлен от опечаток и дополнен в этом разделе и в приложении). В нормальном режиме один из резонансных конденсаторов  $C1, C2$ , заряжается до напряжения шины  $V_r$ . Когда замыкается соответствующий переключатель, резонансный конденсатор



ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

Так как осуществляется дозирование энергии, мощность зарядки Р пропорциональна частоте преобразования

$$P = 2C_r V_r^2 f$$

где  $C_r$  — емкость резонансных конденсаторов C1 и C2. Напряжение нагрузки можно вычислить как [15]

$$V_l = 2E \sqrt{\frac{C_s}{C_r} ft}. \tag{4}$$

Хотя Р невозможно выразить в виде явной функции времени, можно найти выражение для времени, необходимого для зарядки до заданного напряжения нагрузки  $t_{ch}$ . Объединив (3) и (4), получим в нормальном виде

$$t_{chN} = \frac{C_s}{C_d} \frac{\pi V_l^2 \left[ 1 - a \cos \left( \frac{V_l}{E - V_l} \right) \right] + E V_l \sqrt{\frac{E - 2V_l}{E}}}{4\pi E^2} \tag{5}$$

где  $t_{chN} = t_{ch} f_0$ .

Используя (5) и зная выражение для мощности зарядки  $P = (d/dt) (C_s V_l^2/2)$ , можно построить в нормализованном виде графики напряжения нагрузки, мощности зарядки и частоты в зависимости от времени, как показано на рис. 4. Из них видно, что мощность возрастает не линейно, как в системах с зарядкой постоянным током, но скорее имеет место насыщение до ЕОС. Отсюда два следствия: 1) зарядку можно завершать быстрее за счет некоторой перегрузки компонентов преобразователя в начале нагрузки (пусковые токи выше приблизительно на 50 %, хотя и при меньшей частоте — рис. 6 и 11); и 2) меньше энергия/дозы зарядки, передаваемые в накопительный конденсатор в ЕОС, что выгодно в отношении PPR. Однако подробное сравнение двух методов зарядки находится вне рамок этой статьи.

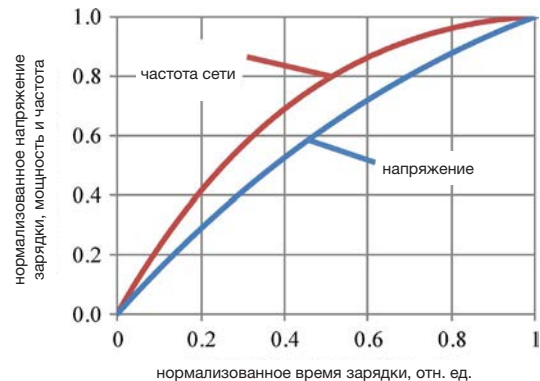


Рис 4. Временная зависимость от нагрузки; напряжения, мощности зарядки и частоты при ZCC

Средства управления на основе вентильных матриц с пользовательским программированием характеризуются гибкостью благодаря возможностям программирования и цифровой обработки. Стандартные функциональные возможности включают многократную защиту (от коротких замыканий, перегрева, перегрузки по току и напряжению, дугowego разряда и т. п.) и средства задания значений напряжения и тока.

разряжается через первичную обмотку, тогда как второй снова заряжается до напряжения шины (см. также временные диаграммы на рис. 21). Если в цепи имеется индуктивность, создается синусоидальная форма колебаний, и в идеальном случае вся накапливаемая в резонансных конденсаторах энергия передается на сторону вторичной обмотки. Если резонансный конденсатор разряжается полностью, но ток не спадает до нуля, включенный параллельно конденсатору подавляющий диод (FWD) предотвращает обратное приложение напряжения. Таким образом, запасенная в индуктивности цепи остаточная энергия передается на выход. Преимуществами дозирования энергии являются жесткое управление передачей энергии и свойственное ограничение тока короткого замыкания и напряжений на компонентах преобразователя.

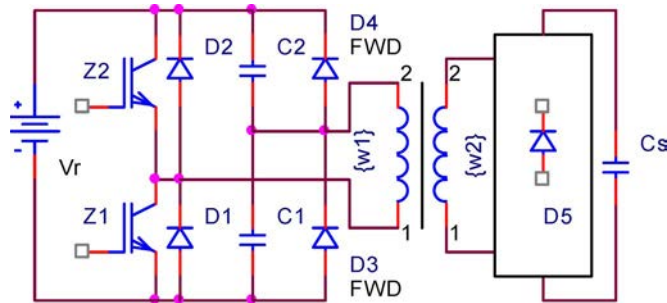


Рис 2. Полумостовой инвертор с конденсаторами дозирования энергии. Трансформатор фактически состоит из двух трансформаторов, чьи первичные обмотки соединены параллельно, а вторичные — последовательно

Максимальная частота, с которой возможна работа для определенного напряжения нагрузки V с пересечением при нулевом токе (ZCC), в нормальном виде определена в [15]

$$f_N(V_l, E) = \frac{1}{\frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{2} a \cos \left( \frac{V_l}{V_l - E} \right) + \frac{E}{2V_l} \sqrt{1 - \frac{2V_l}{E}} \right]} \tag{3}$$

где E — напряжение шины, напряжения шины и нагрузки измеряются относительно одной стороны трансформатора. Частота преобразования f нормализована относительно резонансной частоты  $f_0$  контура, образуемого индуктивностью рассеяния и резонансными конденсаторами;  $f_N = f/f_0$ . Типовой график для этого уравнения показан на рис. 3.

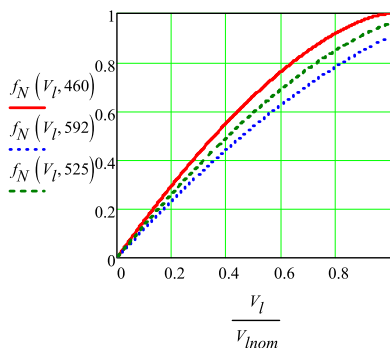


Рис 3. Кривые ZCC для низкого (460 В), высокого (592 В) и номинального (525 В) напряжений шины постоянного тока.  $V_{inom}$  — номинальное напряжение нагрузки.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

Посредством микропрограммы был осуществлен реализующий (3) алгоритм. Он подстраивает частоту переключения от 12,5 до 55 кГц, чтобы обеспечить бестоковую коммутацию (ZCS) для всех возможных случаев, поддерживая максимальный коэффициент заполнения для высокой мощности. Таким образом, потери на переключение фактически отсутствуют, что позволяет использовать относительно медленные недорогие полупроводниковые переключатели как на стороне первичной обмотки, так и на стороне вторичной обмотки.

Для получения необходимых результатов измерений с высокой верностью в целях обеспечения хорошего PPR, был разработан прецизионный делитель обратной связи. Реализованы время нарастания меньше 1 мкс и низкий температурный дрейф.

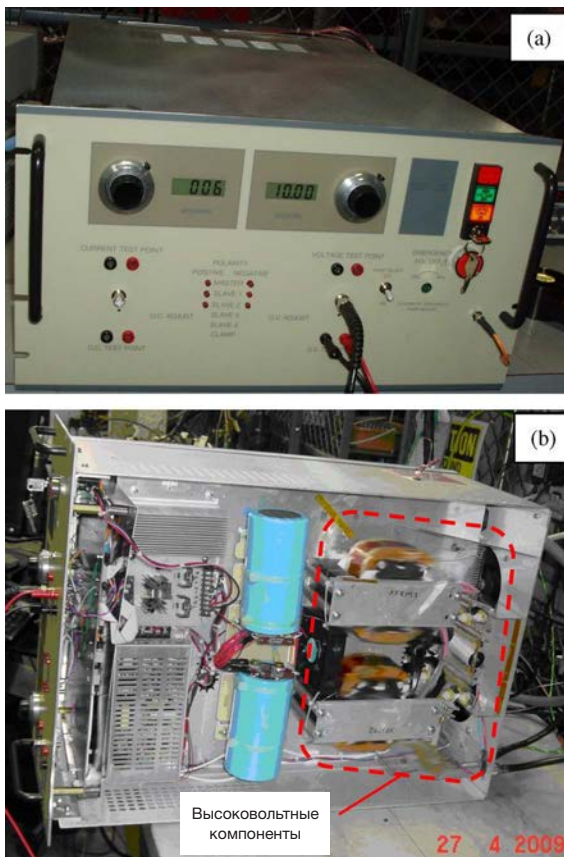


Рис 5. Вид зарядного устройства спереди (а) и в нижней части (b)

Конструктивное оформление выполнено в 19-дюймовом шасси для установки в стойке, высота 10 1/2 дюймов, глубина 24 дюйма. Паразитные индуктивности высоковольтного трансформатора действуют вместе с конденсаторами C1, C2 в резонансной цепи устройства, поэтому внешние дроссели не требуются. Прерыватель цепи и высоковольтный соединитель установлены на задней панели. На виде спереди [рис. 5 (а)] можно видеть переднюю панель, заимствованную у серии Spellman SR6 [17]. Блок по высоте поровну делится на две части. Верхнюю половину занимает выполненный по обычной схеме входной выпрямитель с прерывателем, фильтры ЭМП и компоненты мягкого пуска, и инвертор. Высоковольтные компоненты,

вспомогательный источник питания и фильтрующие электролитические конденсаторы входного выпрямителя расположены в нижней половине [рис. 5 (b)]. Приборная панель расположена на передней панели. Благодаря высокому КПД (см. раздел V-C), допустимо полностью воздушное охлаждение.

Разработанные с помощью программы PSpice всесторонние модели с учетом многочисленных паразитных параметров и имитацией управляющих воздействий для изменения частоты использовались в качестве вспомогательных при разработке и интерпретации экспериментальных данных. Образец моделируемых форм колебаний приведен на рис. 6 для случаев низкого и высокого напряжений в линии. С целью сокращения времени вычислений и более ясного графического представления, в этих моделях  $C_s$  составляла 200 нФ, приблизительно половину значения, использованного в экспериментах. Видно, что в любой момент (кроме того первого импульса, который прерван намеренно) в течение цикла зарядки достигается ZCS. Это подтверждено экспериментально (см. раздел V-B).

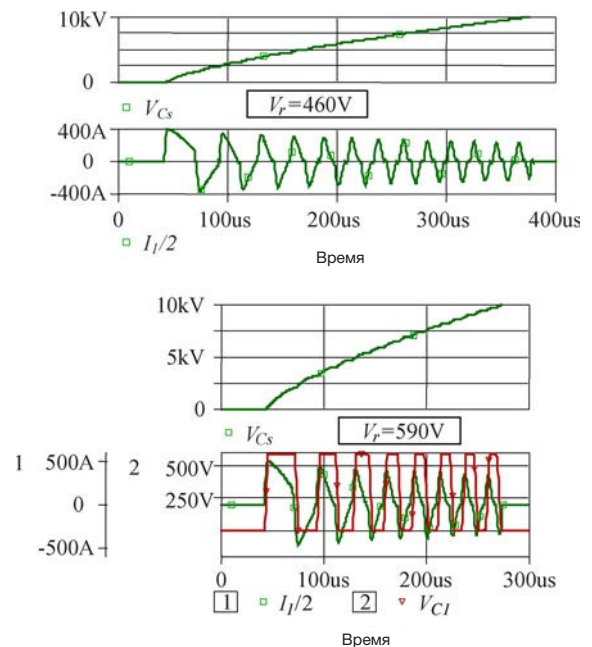


Рис 6. Имитация напряжения шины постоянного тока 460 В и 590 В посредством PSpice. Параметры модели соответствуют такому физическому объекту (индуктивность рассеяния  $L = 3,3$  мГн, приведенная к вторичной обмотке;  $C1 = C2 = 2$  мкФ представляют резонансный конденсатор,  $C_s = 200$  нФ — накопительную емкость). Ток первичной обмотки  $I_1$  разделен надвое

IV. АНАЛИЗ ПОВТОРЯЕМОСТИ

Изменчивость импульсов происходит от нескольких факторов.

- 1) Остаточная энергия преобразователя  $E_{rem}$  в EOC.  $E_{rem}$  может полностью или частично перетекать в накопительный конденсатор, поэтому выходное напряжение будет выше запрограммированного значения.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

- 2) Погрешность генерирования сигнала ЕОС. Она может быть вызвана низким качеством обратной связи, шумом, нестабильным опорным напряжением, и т. п.
- 3) Задержка  $t_d$  между ЕОС и действительным выключением биполярного транзистора с изолированным затвором (БИТЗ). Она учитывает цифровые задержки, задержки оптронов и задержки БИТЗ. Даже постоянная  $t_d$ , если она соизмерима с полупериодом, влияет на PPR. В зависимости от схемы и компонентов,  $t_d$  может составлять доли микросекунды, т. е.  $t_d$  равна доброй части полупериода.

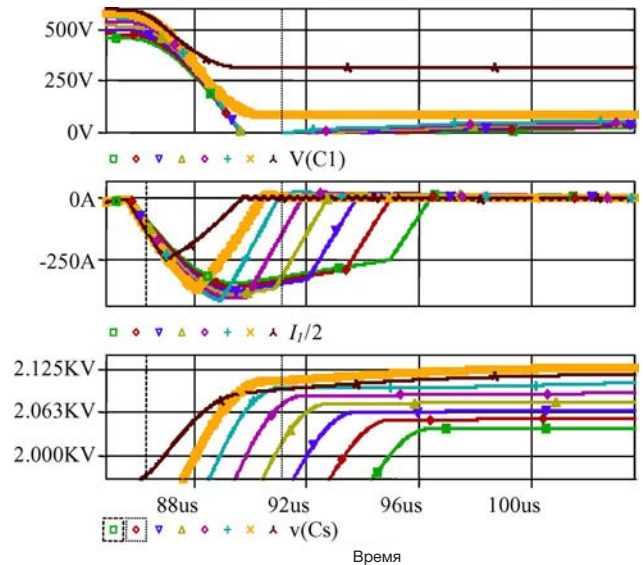
В доступной литературе фактор 1 упоминается только как отрицательный в отношении к PPR. Однако фактор 2 может быть в одинаковой степени важным. Практическое правило заключается в том, что для относительно низковольтных применений и малозумной окружающей среды и интервалов зарядки, охватывающих только несколько периодов частоты преобразования, фактор 1 преобладает. Наоборот, для высокого напряжения в шумной окружающей среде и продолжительной зарядки будет преобладать фактор 2. В настоящей работе фактор 2 в грубом приближении приходится на долю 60 % изменчивости импульсов при максимальном напряжении зарядки. Дальнейшее количественное определение влияния указанных факторов находится вне рамок и целей этой статьи.

Логично допустить, что  $E_{rem}$ , в среднем, пропорциональна квадрату напряжения шины, и  $E_{rem}$  зависит от значения тока первичной/вторичной обмоток в ЕОС. С нашим широким определением  $E_{rem}$  может запасаться в системе где угодно: в индуктивностях утечки и намагничивания, в паразитной емкости высоковольтного трансформатора и выпрямителя, в паразитных индуктивностях сборных шин и соединений и т.п. Ради простоты мы пренебрегаем факторами 2 и 3 и ограничиваем анализ случаем запасаания  $E_{rem}$  только в индуктивности рассеяния.

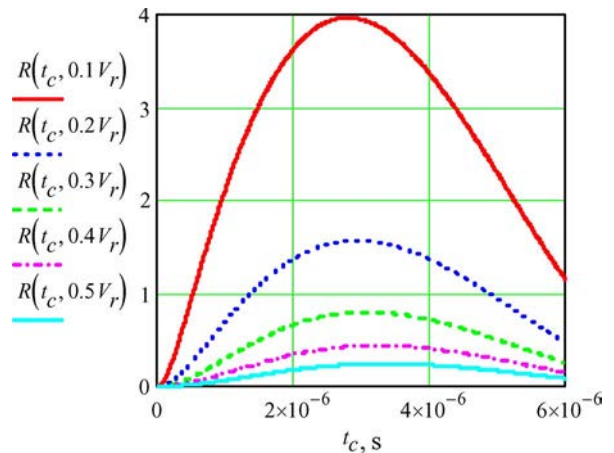
В рассматриваемой цепи  $E_{rem}$  перетекает не только в  $C_s$ , но и частично возвращается в шину источника питания постоянного тока и, в зависимости от начальных условий (НУ), может направляться в резонансные конденсаторы  $C1, C2$ ; часть ее теряется в виде тепла. При открытии транзистора в ЕОС, если соответствующий резонансный конденсатор не разряжен полностью (режим 1), то согласно рис. 2 ток трансформатора течет по следующим контурам (произвольно примем, что нижний переключатель находится в открытом состоянии): положительная клемма  $C1$ , высоковольтный трансформатор, высоковольтный выпрямитель  $D5, C_s$ , FWD  $D2, V_r$ , обратный провод в  $C1$ . Ток FWD разделяется на два, его половина перезаряжает один из конденсаторов делителя  $C2$ . Если включенный параллельно  $C1$  FWD проводит в ЕОС (режим 2), токовый контур не содержит  $C1$ , а замыкается через  $D3$ . Также возможен переход от режима 1 к режиму 2.

Полученные с помощью PSpice типичные формы колебаний для низкого напряжения зарядки 2 кВ (зарядное устройство с номиналом 10 кВ) показаны на рис. 7; они будут полезны в качестве эмпирического руководства для дальнейшего аналитического исследования. В этом параметрическом испытании источником изменчивости было напряжение шины

постоянного тока  $V_r$ , изменяемое от 460 до 600 В приращениями 20 В, которые соответствуют обычным вариациям напряжения 400 В трехфазной линии. ЕОС соответствует прерыванию тока первичной обмотки  $I_1$ .



**Рис 7. Программируемое напряжение зарядки 2 кВ.**  
 $V_r = 460 \text{ В}, 480 \text{ В}, \dots, 600 \text{ В}$ .  $C_s = 200 \text{ нФ}$ . Ток первичной обмотки  $I_1$  разделен надвое. Соответствующие наибольшему переугулированию кривые показаны более толстыми линиями



**Рис 8. Повторяемость R % в зависимости от  $t_c$ , с напряжением нагрузки  $V$  в качестве параметра (в долях напряжения шины, оба приведены к одной и той же стороне высоковольтного трансформатора).**

Номинальное напряжение нагрузки (10 кВ) равно  $V_1 \approx V_r/2$  для низкого линейного напряжения ( $V_r = 460 \text{ В}$  на стороне первичной обмотки).  $C_s = 200 \text{ нФ}$ ,  $C1 = C2 = 2 \text{ мкФ}$ . Сравните с рис. 7

Видно, что максимальное переугулирование происходит не при максимальном прерываемом токе. Более того, одно и то же значение прерываемого тока (одно и то же количество энергии, запасаемой в  $L_j$ ) может в зависимости от синхронизации ЕОС приводить к совсем иным

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

перерегулированиям, как следует из сравнения первой и последней кривых ( $V_r = 460$  В и  $V_r = 600$  В соответственно). Вычисляя с помощью (2) перерегулирование  $\Delta V$  выше программируемого напряжения 2 кВ, которое происходило бы в результате полной передачи  $E_{rem}$  в  $C_s$ , получаем  $\Delta V \approx 450$  В. В этом примере  $E_{rem} = L_s I_1^2 / 2 = 0,2$  Дж для  $I_1 = 500$  А соответствует  $V_r = 460$  В,  $V_r = 600$  В. Видно, что перенапряжения намного меньше, чем приведенные выше оценочные значения даже при больших токах. Таким образом, только часть  $E_{rem}$  достигает  $C_s$ , остальная часть главным образом возвращается в источник шины постоянного тока. Дополнительное наблюдение заключается в том, что наибольшее перерегулирование (нижний график на рис. 7, вторая слева кривая) имеет место тогда, когда напряжение на резонансном конденсаторе не достигло нуля. Кусочная линеаризация цепи и использование соответствующих эквивалентных схем (ЕС) позволяет дать полностью аналитическое описание электромагнитных процессов, имеющих место после ЕОС; начальные условия можно получить из уравнений, приведенных в [15].

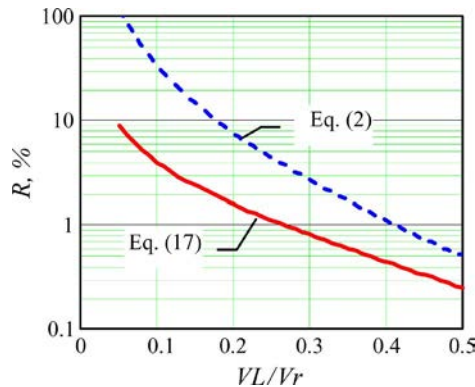


Рис 9. Повторяемость в функции напряжения зарядки,  $C_s = 200$  нФ,  $C1 = C2 = 2$  мкФ, наихудший случай

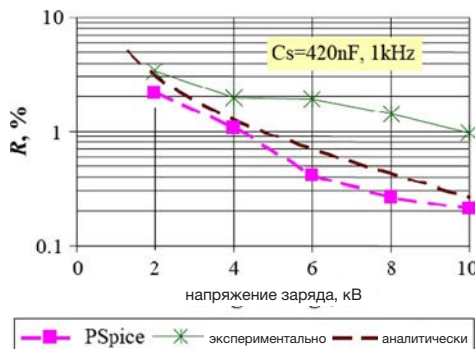


Рис. 10. Повторяемость в функции напряжения зарядки: сводка результатов моделирования PSpice, аналитических вычислений и экспериментальных данных

Аналитическое рассмотрение дано в приложении. В этой статье оно ограничивается наихудшим случаем ЕОС, происходящим в любой момент времени от достижения током в первичной обмотке своего максимального значения. Полученные исходя из этого полный строгий анализ и прогнозирующий

алгоритм управления будут сообщены отдельно. Для параметров преобразователя, соответствующего нашей экспериментальной установке и моделям<sup>1</sup>, повторяемость  $R$  приведена на рис. 8 в виде графической зависимости от времени ЕОС  $t_c$  (нижний индекс «с» означает прерывание). Напряжению нагрузки  $V_L$  служит параметром и задается в виде доли напряжения шины постоянного тока;  $V_L$  и  $V_r$  приведены к одной и той же стороне высоковольтного трансформатора. Так как задействован полумост, номинальное напряжение нагрузки равно  $V_L \approx V_r / 2$  при низком линейном напряжении. Рассматривая изменения  $V_r$  от 460 В (низкое линейное) до 590 В (высокое линейное), замечаем, что повторяемость хуже для высокого линейного напряжения, тогда как номинальное напряжение нагрузки равно  $V_L = 10$  кВ  $\approx V_r / 2 \times 460 / 590 \times k_{tr} = 0,39 k_{tr} V_r$ . Точки максимума кривых обозначают наихудший случай самой неблагоприятной синхронизации ЕОС, и показаны на отдельном графике на рис. 9 вместе с кривой (2). Видно, что полученное опытным путем перерегулирование в несколько раз больше прогнозируемого строгим анализом. Наконец, на рис. 10 показана сводка результатов имитации посредством PSpice, аналитических расчетов и экспериментальных данных. Последние описаны более подробно в разделе V-D. Заметно, что аналитическая кривая лежит очень близко к аналогичной кривой имитации PSpice, всегда выше нее, как и следует, потому что выполняемые с 20-вольтными приращениями  $V_r$  параметрические изменения в PSpice не обязательно прецизионно находят время ЕОС для наихудшего случая.

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

A. Средства измерений

Измерения высокочастотного тока компонентов инвертора выполнены с помощью зонда Rogowski CWT15 PEM. Напряжение  $C_s$  измерялось с помощью зонда Tektronix P6015A. Измерения плавающего напряжения выполнялись с помощью дифференциального зонда Tektronix P5200. КПД и коэффициент мощности измерялись с помощью измерителя мощности Voltech, модель PM300. Контроль температуры осуществляется с помощью термопар, соединенных с регистратором данных (Agilent, модель 34970A) с поддержкой программного обеспечения BenchLink.

B. Форма колебаний

Одна из главных целей этой работы заключалась в реализации наивысшего возможного КПД путем принудительного переключения без потерь во всех возможных случаях для всех уровней зарядки и значений частоты повторения. Помехоустойчивость схемы управления в этом отношении также является важной. Выполнено тщательное экспериментальное исследование совместно с моделированием средствами PSpice. Мы обнаружили, что ни при каких условиях ZCS не нарушается. Эти результаты иллюстрируются следующими рисунками. На рис. 11 (a) показаны  $V_c$  и ток первичной обмотки  $I_1$  в пакетном режиме при PRR 1400 Гц для  $C_s = 420$  нФ (скорость зарядки 29,4 кДж/с), а на рис. 11 (b) показан ток коллектора  $I_c$  одного из транзисторов (масштаб

<sup>1</sup> 200 нФ при имитации, 400 нФ в экспериментах.

увеличен). Сведения о горизонтальных и вертикальных масштабах и цене делений здесь и на дальнейших графиках указаны в легендах для форм колебаний.

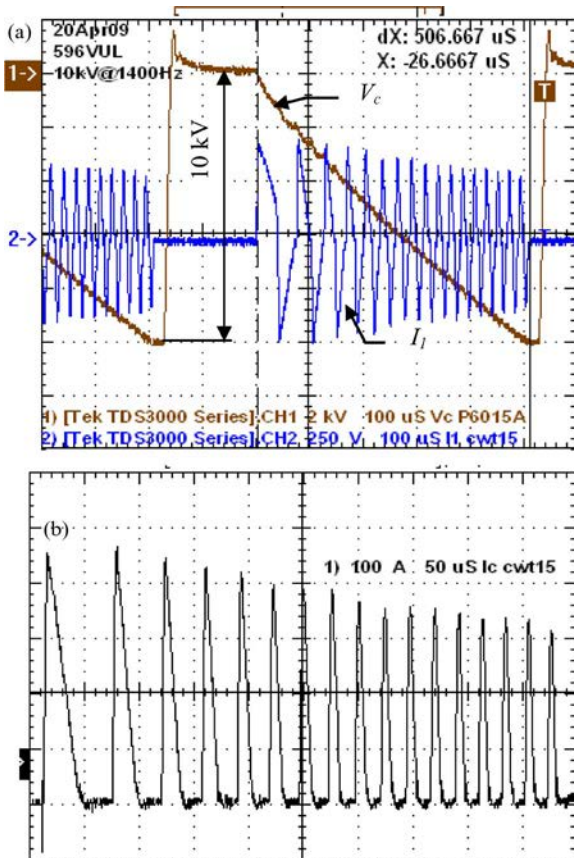


Рис 11. Типовые формы колебаний в линии высокого напряжения. PRR = 1400 Гц в пакете, время зарядки равно 507 мкс. (а) Напряжение на нагрузочном конденсаторе и ток в первичной обмотке. (б) Ток коллектора

Отметим, что экспериментальные кривые  $V_c$  выглядят более близкими к линейной функции, чем их теоретические аналоги на рис. 4. Это несоответствие происходит в результате обширной бестоковой паузы, отсутствующей в аналитическом рассмотрении.

При низком линейном напряжении (самая долгая зарядка),  $C_s = 420$  нФ заряжается за 750 мкс [рис. 12 (а)], поэтому непрерывная работа с такой нагрузкой ограничена до PRR 1 кГц, если требуется достаточная бестоковая пауза между импульсами. При высоком напряжении в линии зарядка завершается быстрее [см. рис 11 (а) и 12 (б)]. Как ясно видно из рис. 11 (б), частота преобразования подстраивается для поддержания высокого коэффициента заполнения, кроме того, поддерживая ZCS. Самая высокая частота преобразования составляет 55 кГц при низком линейном напряжении, с очень большим запасом для обеспечения ZCS без каких-либо токов в интервалах между импульсами даже при провалах линейного напряжения ниже нормальных.

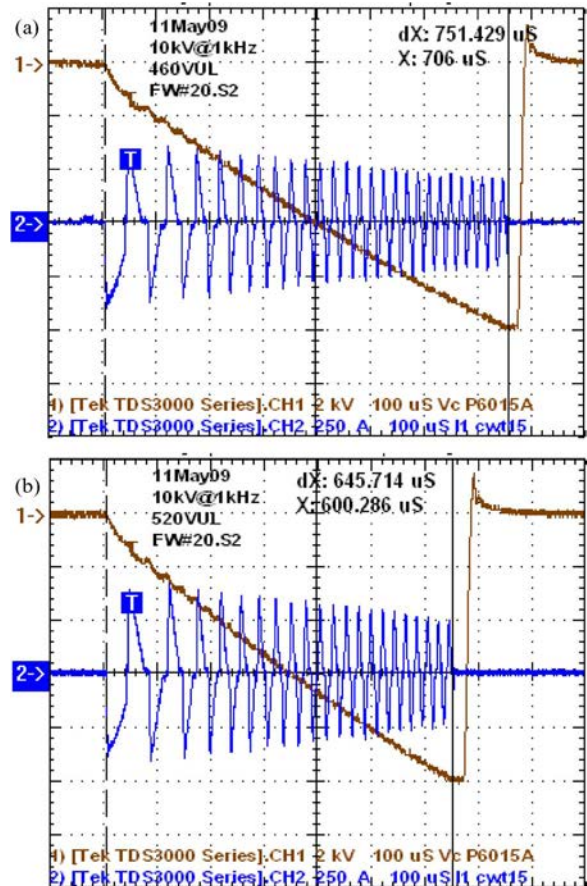


Рис 12. Типичные формы колебаний для 10 кВ при 1000 Гц при (а) низком и (б) номинальном линейном напряжении

### С. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности

КПД вычисляется исходя из значений выходной мощности и мощности нагрузки, измерения последней выполнялись измерителем мощности Voltech PM300. Мощность нагрузки измерялась косвенным методом. Она фактически вычислялась как энергия, приходящаяся на импульс, подаваемый в накопительный конденсатор ( $E = C_s \cdot V_c^2/2$ ), умноженная на PRR. При полной мощности коэффициент полезного действия составил приблизительно 92 %, а коэффициент мощности был равен 94 % (рис. 13). Значения КПД ниже ожидаемых на 1–2 %, что можно объяснить дедуктивно измерениями потерь (см. в [18] описание методов измерения потерь для БТИЗ) и интуитивно рассеянием тепла. Отметим, что перегрев основания БТИЗ составил меньше 40 °С во всех режимах работы. Одним из возможных источников погрешности являются измерения  $V_c$  с низкой точностью (характеристики зонда P6015A указаны при ослаблении по постоянному току  $\pm 3$  %, исключая погрешность осциллографа; мы минимизировали эту погрешность тщательной калибровкой). Каждый процент погрешности измерений напряжения переводится в 2 % погрешности измерений энергии, поэтому неопределенность измерений коэффициента полезного действия весьма заметна.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

запрограммированного напряжения. После обнаружения четкого соответствия данных  $V_c$  и дифференциальных данных  $V_{fdbk}$  мы продолжили только с прямыми измерениями  $V_c$ .

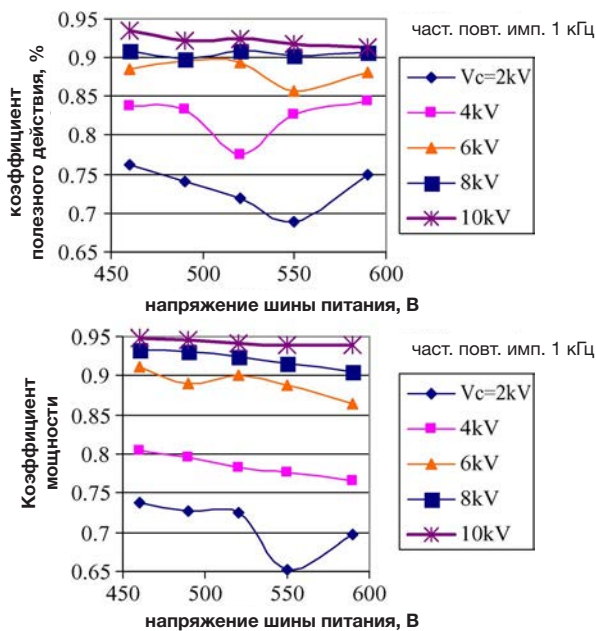


Рис 13. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности в зависимости от напряжения шины для различных напряжений зарядки

D. Повторяемость

Мы будем различать здесь кратковременную и установившуюся PPR. Последняя определяется как полученная для следующих друг за другом N импульсов. В наших измерениях N = 80, выборка от 121-го до 200-го импульса. Таким образом, кратковременная PPR не подвергается влиянию тепловых дрейфов, старения компонентов и т.п. На нее влияют вариации напряжения высокочастотной шины в рамках колебательных переходных процессов напряжения высокочастотной шины, исключая медленные изменения на входе. На установившуюся PPR также влияют вариации напряжения шины в полном заданном диапазоне, например от 460 до 590 В постоянного тока (соответствует 400 В пер. +10%/–14%). В этой статье установившаяся PPR рассматривается в отношении этих вариаций, другие параметры не учитываются.

Измерения PPR выполнены с использованием возможности FastFrame осциллографа DPO7054. Осуществлялся одновременный контроль до четырех сигналов включительно. Напряжение нагрузки  $V_c$  измерялось повторно с помощью зонда P6015A, но с 100-милливольтовой шкалой и 10-вольтовым смещением, позволяющими уместить на экране сигнал в EOC. Также осуществлялся контроль напряжения обратной связи  $V_{fdbk}$  (с теми же чувствительностью и смещением) и ток в первичной обмотке. Недостатком этих прямых измерений является их низкое разрешение, порядка нескольких битов разрешения осциллографа по вертикали. Возможно, лучшим является метод дифференциального измерения, например контроль разности напряжения обратной связи и запрограммированного напряжения. В таком случае в EOC осциллограф зарегистрировал бы практически нулевое напряжение. При дифференциальном измерении к напряжению обратной связи добавлялось напряжение смещения со значением

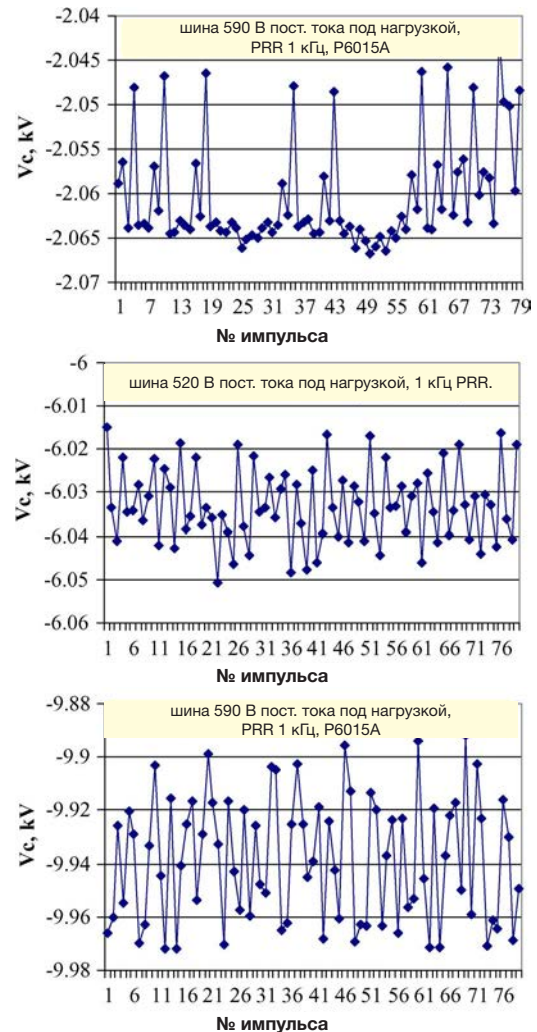


Рис 14. Изменчивость импульсов, полученная посредством FastFrame.  $C_s = 420$  нФ, част. повт. имп. 1 кГц, 2-, 6- и 10-киловольтные настройки. См. пояснения для напряжения шины на врезке

Запуск осциллографа осуществлялся по событию EOC. В этих экспериментах переключатель разрядки DSw отключался через 20 мкс после EOC.

Первые 800 импульсов собраны с 500-точечным разрешением по шкале 4 мкс/дел. Формы колебаний были сохранены в виде снимков экрана, 80 кадров начиная с 121-го были сохранены в формате csv. Была сформирована таблица Excel, в которой были обработаны 79 импульсов<sup>1</sup>; они графически представлены на рис. 14, показывающем изменение  $V_c$  от импульса к импульсу для нескольких напряжений шины постоянного тока.

<sup>1</sup> Показанные значения являются усредненными для 50 точек, начиная с точки 250 сбора данных (приблизительно средняя часть экрана на рис. 15).

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

На рис. 15 показаны три типичных снимка с экрана для наложений из 80 кадров. Они соответствуют данным рис. 14 и показывают где развивается, по меньшей мере, частично, изменчивость. В ЕОС ток в первичной обмотке прерывается случайно. Если имеется определенный порядок (как видно при настройках для 2 кВ и 6 кВ), PPR улучшается. Когда ток прерывается в произвольный момент времени (10-киловольтные настройки) PPR ухудшается на участках передних и задних фронтов и в нулевых точках. При максимальном напряжении и PPR она все еще остается ниже 1% благодаря специфическим особенностям применяемой топологии преобразователя и высокой частоты преобразования.

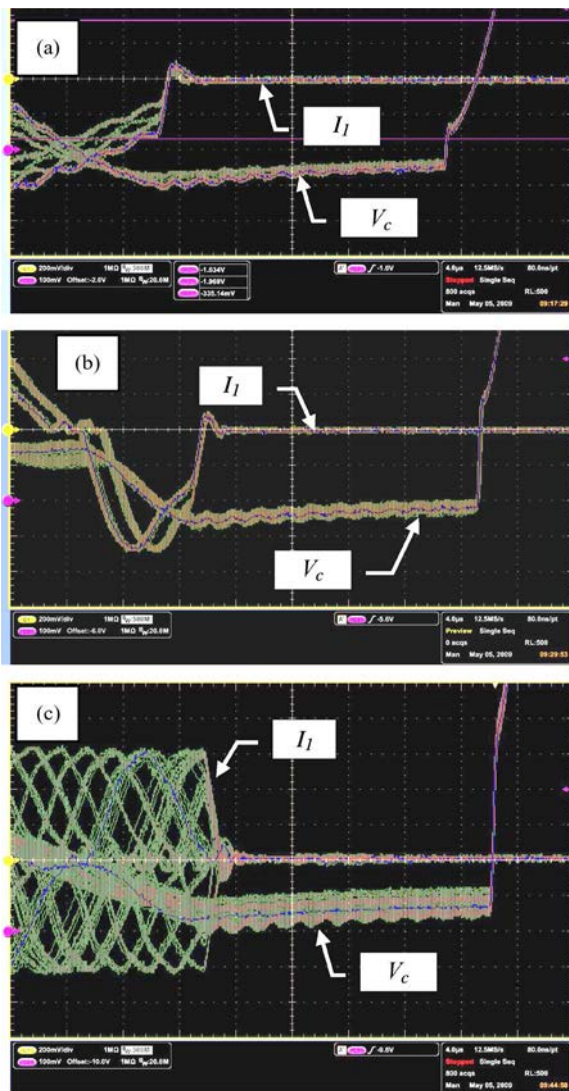


Рис 15. Наложение 80 кадров ( $V_c$  –100 В/дел.,  $I_1$  –100 А/дел.) для: (а) высокого линейного напряжения, 2 кВ при 1 кГц; (б) номинального линейного напряжения, 6 кВ при 1 кГц; и (с) высокого линейного напряжения, 10 кВ при 1 кГц. Развертка по горизонтали 4 мкс/дел

Для трех настроек напряжения шины постоянного тока, а именно 460, 520, и 590 В пост., PPR была рассчитана с помощью формулы, которая в Excel выглядит следующим образом:

$$R = \frac{\min(A2 : C80) - \max(A2 : C80)}{\text{average}(A2 : C80)} * 100 \quad (6)$$

где в столбцах А–С содержатся значения каждого  $V_c$  для 79 последовательных импульсов для 460, 520 и 590 В пост. тока соответственно, т. е.  $3 \times 79 = 237$  импульсов. В качестве альтернативы мы изменяли линейное напряжение непрерывно от низкого до высокого уровня, чтобы найти наименее устойчивый режим, т. е. с наибольшими вариациями  $V_c$ . Для этого метода PPR рассчитывалась по (1) с использованием значений  $V_{C \max}$ ,  $V_{C \min}$  из всего диапазона измерений.

Графики кратковременной и установившейся PPR приведены на рис. 16 и 17 соответственно. Показанные на рис. 17 экспериментальные кривые рассчитаны с помощью (1), (6); они имеют обозначения как «полностью экспериментально», и «экспериментально по 3 шинам постоянного тока» соответственно. Таким образом, каждая точка первой кривой составлена из тысяч импульсов, и каждая точка второй кривой содержит 237 импульсов. Изменчивость больше, чем прогнозируемая теорией, учитывающей только фактор 1 («аналитическая» кривая). Это несоответствие можно отнести к погрешностям измерений и задержкам распространения (факторы 2, 3).

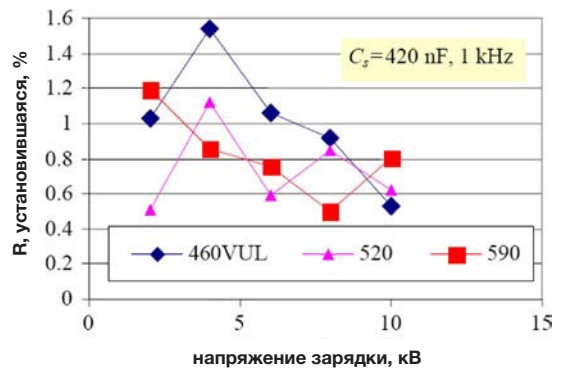


Рис 16. Кратковременная повторяемость

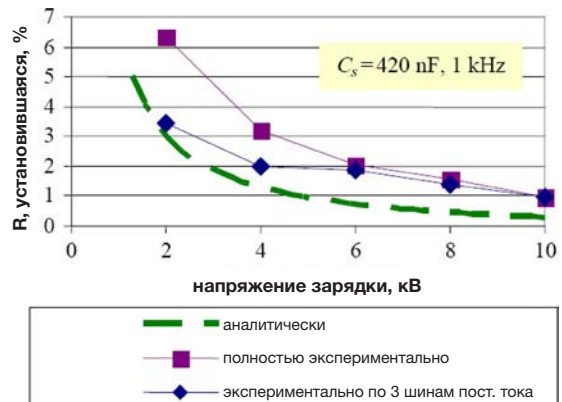


Рис 17. Установившаяся повторяемость в функции напряжения зарядки – сводка аналитических вычислений и экспериментальных результатов

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

Все приведенные выше результаты имеют отношение к экспериментам с  $C_s = 420$  нФ. Дополнительные измерения были выполнены с намного меньшим  $C_s = 33$  нФ. Типичная форма колебаний при зарядке показана на рис. 18. Короткое время зарядки допускает большую PRR, до 7 кГц, оставляя достаточное количество времени между циклами зарядки. Однако с нашим переключателем разрядки на основе кремниевого тиристора было невозможно работать с системой при таком высоком PRR.

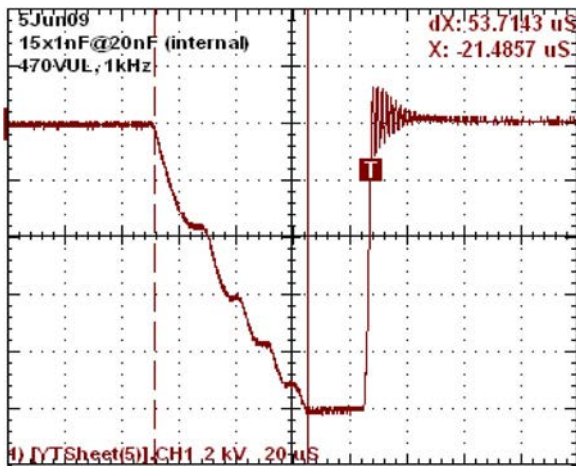


Рис. 18. Испытание узла 33-нанофарадного конденсатора. Время зарядки равно 53 мкс

Удивительно то, что, несмотря на происходящее случайно прерывание тока в EOC (рис. 19), даже с этой очень низкой емкостью PPR лучше 1 % при 10 кВ и  $V_r = 470$  В. Однако при непрерывной вариации  $V_r$  PPR хуже. Сводка результатов показана на рис. 20. Отметим, что аналитическая кривая не имеет силы, если зарядка происходит в течение одного из двух полупериодов, что имеет место в случае настроек для напряжения 2 кВ и 4 кВ. Ко времени написания этой статьи зарядное устройство находилось в непрерывной работе в течение 3000 часов, сгенерировав более 1010 10-киловольтных импульсов с частотой 1 кГц, с продолжением испытаний.

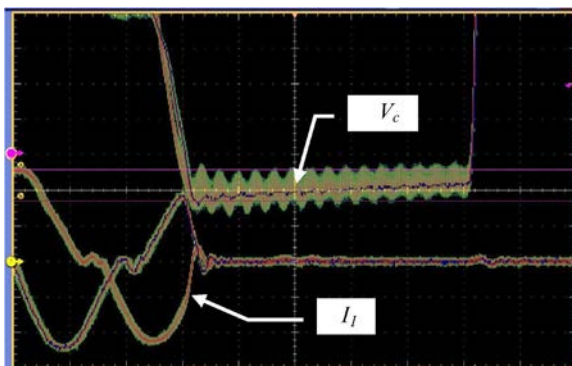


Рис 19. Наложение 600 кадров ( $V_c$ —100 В/дел.,  $I_1$ —200 А/дел.)  $C_s = 33$  нФ; 10 кВ при 1 кГц,  $V_r = 470$  В верхняя граница. Развертка по горизонтали 4 мкс/дел

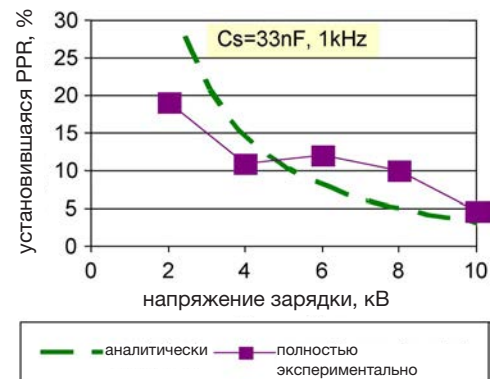


Рис 20. PPR при зарядке конденсатора малой емкости

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эта разработка имеет принципиальное значение для недорогой общей технологии зарядки высоковольтных конденсаторов большой мощности с высокой частотой повторения и высоким КПД. Для демонстрации было выбрано сочетание характеристик 10 кВ, 20 кДж/с, и 1 кГц PRR. Применена топология инвертора с дозированной подачей энергии с развитой логикой управления, оптимизирующей частоту коммутации для получения высокого коэффициента полезного действия. Коммутация выполняется на частоте до 55 кГц, что позволяет использовать недорогие БТИЗ с относительно низкой частотой переключения. Высокий КПД позволяет использовать компактную конструкцию с полностью воздушным охлаждением. Продемонстрирована хорошая PPR.

Тщательный анализ повторяемости выполнен в открытой публикации, насколько нам известно, впервые. Полученные результаты позволяют точно оценивать достижимую установившуюся PPR для резонансной топологии дозирования энергии. Их также можно распространить на случай классических последовательных резонансных преобразователей. Усовершенствование измерений может сузить зазор между теоретическими ограничениями, обнаруженными в результате аналитического исследования, и экспериментальными результатами для установившейся повторяемости. Кроме этого, полученные уравнения позволяют построить прогнозирующий алгоритм управления, открывая тем самым путь для значительного улучшения PPR без какого-либо снижения скорости зарядки. Об этой работе будет сообщено позже. В этой статье полностью представлен только анализ для наихудшего случая.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Сигнал EOC вырабатывается, когда напряжение зарядки достигает предварительно установленного значения. Это может происходить в любое время в пределах интервала проводимости транзистора, и даже в течение бестоковой паузы, так как некоторая остаточная энергия  $E_{rem}$  все еще циркулирует в системе. Если программируемое напряжение нагрузки вычисляется как  $V_L = \sqrt{2E_c/C_s}$ , и действительное



ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

напряжение зарядки равно  $V_L + \Delta V_L = \sqrt{2(E_c + E_{rem})/C_s}$ , то, принимая что  $E_{rem}$  поступает в  $C_s$ , преобразуем (1) в

$$R = \sqrt{1 + \frac{E_{rem}}{E_c}} - 1. \quad (7)$$

Уравнение (7) представляет упрощенное выражение PPR, дающее в значительной степени завышенные значения (см. Введение).

Последний предшествующий EOC полупериод начинается как обычно, т. е. один из резонансных конденсаторов зарядился до напряжения шины, а другой полностью разрядился. Здесь мы пренебрегаем колебаниями напряжения шины/сборной шины и падением напряжения на FWD. Полная эквивалентная схема показана на рис. 21 (а). Здесь  $C = 2C_1 = 2C_2$ , диод DHV означает высоковольтный выпрямитель. Использована T-образная эквивалентная схема трансформатора, где  $L_{s1}$ ,  $L_{s2}$  — индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток соответственно,  $L_{mu}$  — индуктивность намагничивания,  $C_{p2}$  — паразитная емкость трансформатора. Все параметры и переменные приведены к вторичной обмотке.

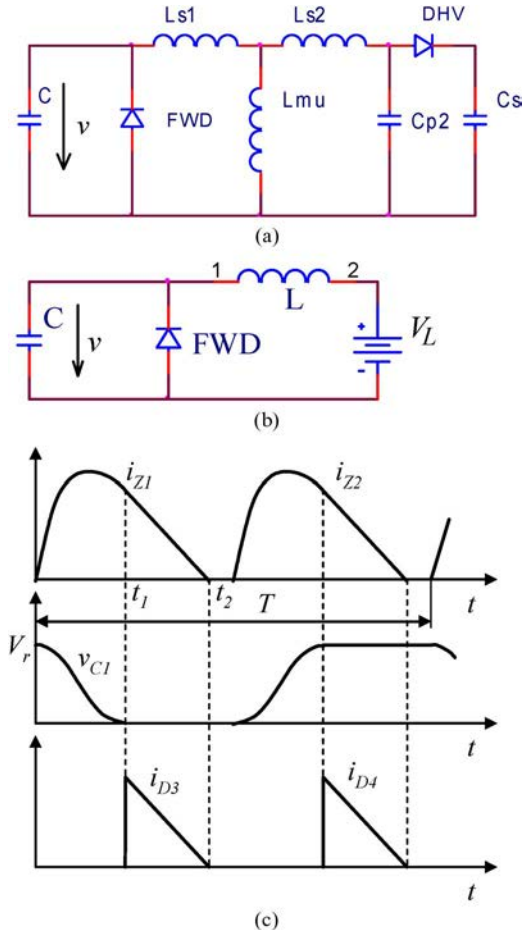


Рис. 21. (а) Полная эквивалентная схема. (б) Приведенная эквивалентная схема. (с) Диаграммы синхронизации в нормальном режиме (обозначения см. на рис. 2)

Полная схема является достаточно сложной для аналитического исследования. В нашем случае трансформатора с закрытой магнитной системой намагничивающим током можно пренебречь. В применениях с большой мощностью также можно пренебречь паразитными емкостями высоковольтного трансформатора и выпрямителя. Также принимаем допущение, что напряжение нагрузки  $V_L = V_c$  в течение полупериода частоты преобразования изменяется незначительно; следовательно, накопительный конденсатор можно представить в виде противоположно направленной ЭДС, равной напряжению нагрузки. Это общее допущение справедливо, если зарядка завершается в течение двух или больше периодов частоты преобразования. Далее приводим схему на рис. 21 (а) к виду, показанному на рис. 21 (б), и соответствующие уравнения и расчет временных диаграмм можно заимствовать в [15]. Здесь  $L$  — индуктивность рассеяния трансформатора.

Ток в индуктивности  $L$  и напряжение на резонансном конденсаторе  $C$  перед  $t_1$  определяются выражением (исправлена допущенная в [15] опечатка)

$$i_1 = \frac{V_r - V_L}{\rho} \sin \omega t, \quad v_1 = (V_r - V_L) \cos \omega t + V_L \quad (8)$$

где  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ ,  $\rho = \sqrt{L/C}$ .

После выработки EOC в момент времени  $t_c$ , эквивалентная схема принимает вид, показанный на рис. 22. Значения показаны только для справки. Эта эквивалентная схема действительна до тех пор, пока фиксирующий FWD не начнет проводить ток. Для указанных стрелками направлений тока и напряжения схему описывает дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 v}{dt^2} + \omega^2 v = \omega^2 (V_L + V_r). \quad (9)$$

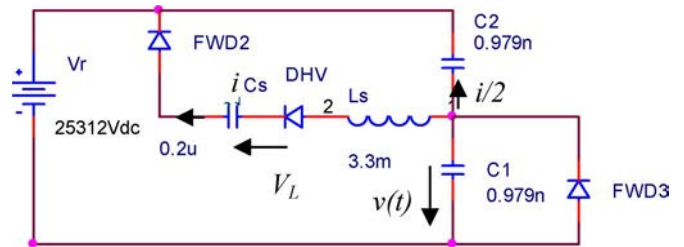


Рис 22. Эквивалентная схема после EOC.

FWD2 включен параллельно транзистору, DHV обозначает высоковольтный выпрямитель. Все параметры приведены к вторичной обмотке. Ток  $L_s$  одинаково распределяется между  $V_r$  и  $C_2$ , если FWD3 не проводит

Уравнение (8) обеспечивает НУ для анализа

$$i_1(t_c) = \frac{V_r - V_L}{\rho} \sin(\omega t_c)$$

$$v_1(t_c) = (V_r - V_L) \cos(\omega t_c) + V_L \quad (10)$$

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

или, снова начиная из нуля, отсчет времени для изображенной на рис. 22 эквивалентной схемы

$$i_1(0) = \frac{V_r - V_L}{\rho} \sin(\omega t_c), \quad \frac{dv_1}{dt}(0) = -\frac{i(0)}{C}. \quad (11)$$

Уравнение (9) с НУ (10) имеет решение

$$v = (V_L - V_r) \sin \omega t_c \cdot \sin \omega t + [(V_r - V_L) \cos \omega t_c - V_r] \cos \omega t + V_r + V_L \quad (12)$$

откуда ток индуктивности равен

$$i = \frac{1}{\rho} [(V_r - V_L) \sin \omega(t + t_c) - V_r \sin \omega t]. \quad (13)$$

Он проходит через нуль в момент времени  $T_{ei}$

$$T_{ei} = \frac{1}{\omega} \arctg \frac{(V_L - V_r) \sin \omega t_c}{(V_r - V_L) \cos \omega t_c - V_r}. \quad (14)$$

Зависящий от времени ЕОС,  $C_s$  и напряжения нагрузки, последнее возрастает после ЕОС согласно

$$\Delta V_L = \frac{1}{C_s} \int_0^{T_{ei}} i dt. \quad (15)$$

В этом анализе есть некоторая противоречивость, так как не учитывается действие ограничивающего FWD. При более правильном подходе следовало бы проверить условия равенства нулю для напряжения  $v$ , интегрировать до момента времени, в который напряжение переходит через нуль, и продолжить анализ из этой точки, используя более простую эквивалентную схему, которую представляет подмножество элементов на рис. 22, с недействующими  $C_1, C_2$ . Однако в этом месте мы упрощаем анализ, допуская, что в наихудших случаях  $C$  полностью не разряжается. Это предположение возникло на основании формального анализа, моделей и эксперимента.

В результате некоторых преобразований получаем перерегулирование на выходе

$$\Delta V = \frac{C}{C_s} \{ (V_r - V_L) [\cos \omega t_c - \cos(\omega T_{ei} + \omega t_c)] - V_r(1 - \cos \omega T_{ei}) \} \quad (16)$$

и повторяемость  $R$  % согласно (1), ( $V_{cav} = V_L$ , окончательно в виде формулы

$$R = \frac{100}{V_L} \frac{C}{C_s} \{ (V_r - V_L) [\cos \omega t_c - \cos(\omega T_{ei} + \omega t_c)] - V_r(1 - \cos \omega T_{ei}) \}. \quad (17)$$

Уравнения (12)–(17) действительны, если  $v$  не достигает нуля прежде, чем это сделает  $i$ .

Введя безразмерную переменную  $u_1 = V_L/V_r$ , перепишем (17) в виде

$$R = 100 \frac{C}{C_s} \{ (1/v_l - 1) [\cos \omega t_c - \cos(\omega T_{ei} + \omega t_c)] - 1/v_l(1 - \cos \omega T_{ei}) \} \quad (18)$$

графически показанном на рис. 23; (16) представлено на рис. 24 для  $V_r = 550$  В. В этих вычислениях  $C_1 = C_2 = 2$  мкФ ( $C = 1,958$  нФ),  $C_s = 200$  нФ. Видно, что максимальная погрешность возникает в интервале  $t_c$ , который несколько меньше четверти периода резонансной частоты  $T = \omega/2\pi$ .

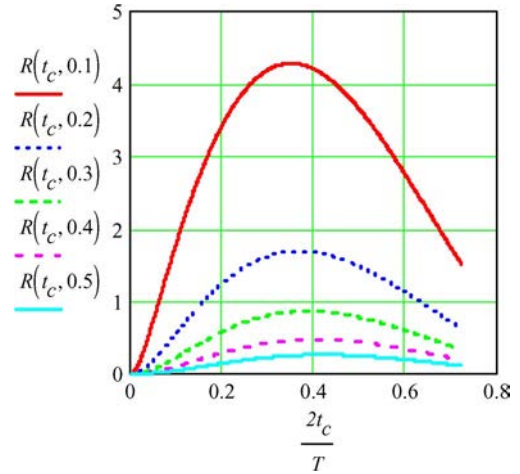


Рис 23. Повторяемость  $R$  % в зависимости от времени прерывания  $t_c$ , с нормализованным напряжением нагрузки  $u_1$  в качестве параметра.  $T = 2\pi/\omega$ .

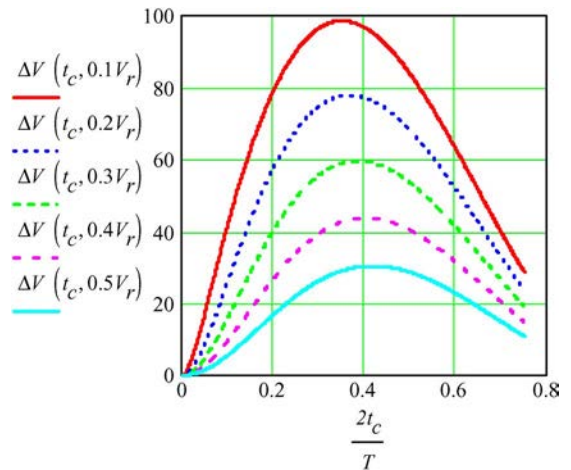


Рис 24. Зависимость перерегулирования напряжения нагрузки от синхронизации ЕОС  $t_c$  для  $V_r = 550$  В. Напряжение нагрузки в виде доли  $V_r$  является параметром

Снова используем (8) и переписываем его в нормальном виде

$$i_{2n} = (1 - v_l) \sin \omega t, \quad v_{2n} = (1 - v_l) \cos \omega t + v_l \quad (19)$$

где  $i_{2n} = i_2/I_0$ ,  $I_0 = V_r/\rho$ ,  $v_{2n} = v_2/V_r$ , отметим, что резонансные конденсаторы не разряжаются до нуля до момента  $t_c \sim 0,5T$ , который показан на рис. 25.

Научные статьи

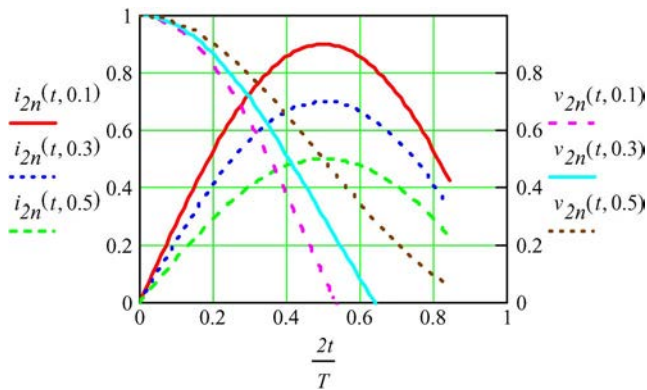


Рис 25. Нормализованный ток индуктивности и напряжение на резонансном конденсаторе.  $v_l$  является параметром

В качестве альтернативы можно решить

$$\frac{dR(t_c, V_l)}{dt_c} = 0 \quad (20)$$

относительно  $t_c$ , чтобы найти значения, при которых  $R$  достигает максимума. Этот момент времени обозначен как  $T_{cm}$ . Выкладки здесь не приведены по причине их громоздкости, но решение в графическом виде, представленное на рис. 26, в соответствии с рис. 25 ясно показывает, что наилучший PPR соответствует тому моменту времени в ЕОС, в который резонансные конденсаторы не разряжены полностью. Тщательный анализ последовательности эквивалентных схем представляет еще большую сложность; на рис. 27 мы приводим пример графика, подтверждающий обоснованность изложенных выше положений. Таким образом, анализ наилучшего случая завершен.

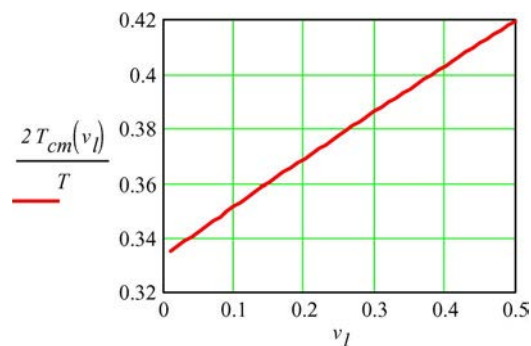


Рис 26. Наименее благоприятный для прерывания момент в зависимости от нормализованного напряжения нагрузки

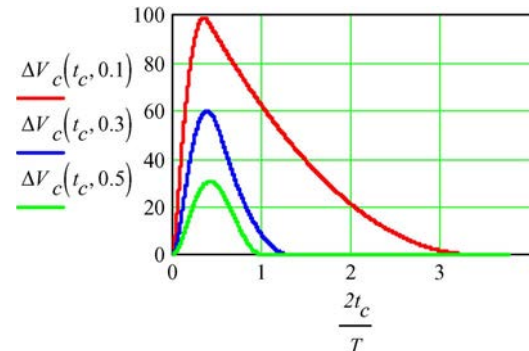


Рис 27. зависимость приращения напряжения нагрузки от синхронизации ЕОС  $t_c$  для  $V_r = 550$  V. Сравните с рис. 24

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А. Липовичу (A. Lipovich) за его помощь в разработке механической части.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] H. Bluhm, Pulsed Power Systems: Principles and Applications. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2006.
- [2] [Online]. Available: <http://www.gaep.com/product-applications.html>
- [3] J. Jichetti, A. Bushnell, and R. McDowell, "Precision capacitor charging switching power supplies," in Proc. 14th IEEE Pulsed Power Conf., Jun. 2003, pp. 522–525.
- [4] G. L. Bees and A. Tydeman, "Capacitor charging power supply design for high pulse to pulse repeatability applications," in Proc. 12th IEEE Pulsed Power Conf., Jun. 1999, pp. 397–398.
- [5] J. Biebach, P. Ehrhart, A. Müller, G. Reiner, and W. Weck, "Compact modular power supplies for superconducting inductive storage and for capacitor charging," IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 1, pp. 353–356, Jan. 2001.
- [6] M. M. McQuage, V. P. McDowell, F. E. Peterkin, and J. A. Pasour, "High power density capacitor charging power supply development for repetitive pulsed power," in Proc. PM, 2006, pp. 368–371.
- [7] A. K. Joint, C. P. Henze, C. B. Henze, and K. Conroy, "Development of a 350 kW, 10 kV pulse power converter for capacitor charging," in Proc. 22nd APEC, Feb. 25–Mar. 1, 2007, pp. 1164–1170.
- [8] J. S. Oh, S. D. Jang, Y. G. Son, M. H. Cho, and W. Namkung, "Development and application of an inverter charging supply to a pulse modulator," in Proc. LINAC, Gyeongju, Korea, 2002, pp. 205–207.
- [9] H. J. Ryoo, S. R. Jang, J. S. Kim, and Y. B. Kim, "Design and testing of the high voltage capacitor charger for 150 kJ pulsed power application," in Proc. 17th Int. Pulsed Power Conf., Washington, DC, Jun. 28–Jul. 2, 2009.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи**

- [10] Regulation and Repeatability, APP Note 509, A.L.E. Systems. [Online]. Available: [http://www.us.tdk-lambda.com/hp/product\\_html/high\\_volt.htm](http://www.us.tdk-lambda.com/hp/product_html/high_volt.htm)
- [11] High Power, High Voltage Power Supply Voltage Regulation. [Online]. Available: <http://www.gaep.com/voltage-regulation.html>
- [12] R. Ness, P. Melcher, G. Ferguson, and C. Huang, "A decade of solid state pulsed power development at Cymer Inc.," in Proc. 26th Power Modulator Symp., May 23–26, 2004, pp. 228–233.
- [13] A. Pokryvailo, C. Carp, and C. Scapellati, "High power, high efficiency, low cost capacitor charger concept and demonstration," in Proc. 17th IEEE Int. Pulsed Power Conf., 2009, pp. 801–806.
- [14] B. D. Bedford and R. G. Hoft, Principles of Inverter Circuits. New York: Wiley, 1964.
- [15] B. Kurchik, A. Pokryvailo, and A. Schwarz, "HV converter for capacitor charging," in Pribory i Tekhnika Experimenta. New York: Plenum, 1990, pp. 121–124.
- [16] M. Wolf and A. Pokryvailo, "High voltage resonant modular capacitor charger systems with energy dosage," in Proc. 15th IEEE Int. Conf. Pulsed Power, Monterey, CA, Jun. 13–17, 2005, pp. 1029–1032.
- [17] [Online]. Available: <http://www.spellmanhv.com/Products/Rack-Supplies/SR.aspx>
- [18] A. Pokryvailo and C. Carp, "Accurate measurement of on-state losses of power semiconductors," in Proc. 28th Int. Power Modulators Symp., Las Vegas, NV, May 27–31, 2008, pp. 374–377.



**Алекс Покрываило** (M'05-SM'07) родился в России, в городе Выборг. Он получил степени к.т.н. и д.т.н. в области электротехники в Ленинградском политехническом институте в Санкт-Петербурге (Россия) в 1975 и 1987 гг. соответственно.

Прежде работал в Soreq NRC, Явне, Израиль, сейчас является сотрудником Spellman High Voltage Electronics Corporation, Наупрауге, NY. Его текущие и недавние работы относятся к импульсной мощности; особое внимание уделяется сильноточным открывающим и закрывающим коммутирующим устройствам и проектированию магнитных цепей, быстрой диагностике, разработке мощных высоковольтных импульсных источников питания, и коронным разрядам. Ранее он изучал бездуговое переключение, разрабатывал элегазовую коммутационную аппаратуру, проводил исследование в области взаимодействия пламени с электромагнитными полями и т. д. Опубликовал свыше 100 статей, два учебника (на иврите), он является держателем более чем 20 патентов, относящихся к высоковольтной технике.

**Костел Карп** (M'07), фотография и биография ко времени публикации отсутствовали.

**Клиффорд Скапеллати** (M'92), фотография и биография ко времени публикации отсутствовали.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Научные статьи

В свете изложенного выше были выполнены испытания нескольких видов концов высоковольтных кабелей с полиэтиленовой изоляцией для проверки на диэлектрическую прочность и LC вплоть до уровня пикоампер. В цель этой работы не входит исследование явления частичных разрядов (PD) в основной части кабеля или в его концах, хотя мы полностью осведомлены о возможной корреляции между PD и LC.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В этом разделе описаны компоновка испытательной установки, конструкция испытанных кабелей и порядок выполнения эксперимента.

#### Испытательная установка

Испытательный стенд (рисунок 1) состоит из блока испытательного источника питания (PSU) V1 с его высоковольтным кабелем T1, испытываемого кабеля (CUT) T2, а также средств измерений и оборудования сбора данных. Два PSU (серии Spellman SL130kV и XRF180kV) обеспечивают плавное регулирование напряжения и высокую стабильность в диапазоне 0–130 кВ и 0–180 кВ для положительной и отрицательной полярностей соответственно. Высоковольтные клеммы CUT и кабеля PSU соединены вместе, тогда как экран CUT заземлен через средство измерений тока (пикоамперметр Keithley 6487). Типовая физическая реализация показана на рисунке 2.

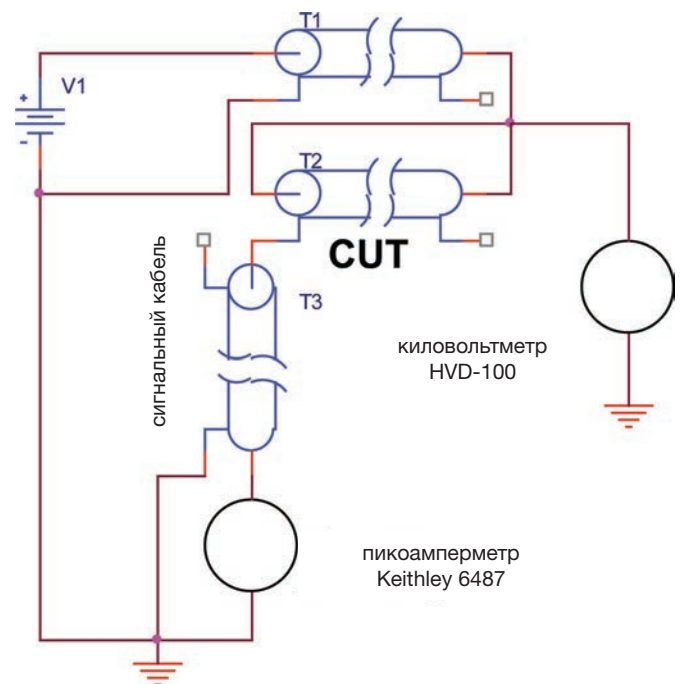


Рисунок 1. Компоновочная схема испытательной установки

Высоковольтные клеммы всех кабелей были физически соединены с высоковольтным электродом делителя напряжения (Spellman, модель HVD-100) [7], способным подавлять коронный разряд вплоть до 130 кВ, как подсказал электрический

## Сравнительные испытания простых концов высоковольтных кабелей

Алекс Покрывайло (Alex Pokryvailo),  
Костел Карп (Costel Carp)  
и Клифф Скапеллати (Cliff Scapellati)  
Spellman High Voltage Electronics Corporation  
475 Wireless Boulevard  
Hauppauge, NY 11788

В концах высоковольтных кабелей токи утечки часто берут начало в заземленном экране. Конструктивные факторы значительно влияют на их абсолютную величину и поведение во времени.

**Ключевые слова:** высоковольтный кабель, постоянный ток, полиэтиленовая изоляция, усадочные трубки, ленты для защиты от коронного разряда, коронный разряд, пространственный заряд

### ВВЕДЕНИЕ

В высоковольтных системах концы кабелей являются одним из самых слабых звеньев. Большинство отказов происходят на стороне заземленного экрана. Эта сторона в особенности подвержена воздействию электрического поля в местах соединений в свободном пространстве. Контроль поля и строгое соответствие технологических процессов являются ключевыми для надежного функционирования. Первое реализовывалось в течение столетия с помощью выравнивающих конусов в соединениях с заполнением твердым диэлектриком. Позже с большим успехом для коронозащиты использовались нелинейные материалы в виде краски, лент и труб (см., например, [1]–[3] и их библиографию). В приложениях для постоянного тока, которые представляют основной интерес в этой статье, спадающая характеристика удельное сопротивление — напряженность обеспечивает эффективное отталкивание электрического поля от конца экрана, где оно сильнее всего.

Опубликовано множество расчетов поля для концов кабелей, выполненных аналитическими и численными методами с использованием линейного и нелинейного подходов [1]–[6]. Понятно, что они не рассматривают образование пространственного заряда, возникающего в результате ионизации вокруг острых краев. Фактически большинство конструкций избегают сильных полей, способных вызвать ионизацию. Похоже, что работ, рассматривающих протекающий в конце кабеля ток утечки (LC), немного или совсем нет. В слабых точных прецизионных высоковольтных приложениях эти токи могут быть сопоставимы с током нагрузки и, будучи по природе нестабильными, могут компрометировать стабильность. Одновременно с этим недорогая конструкция ограничивает использование высококачественных материалов и (или) тщательную проработку метода управления полем. Эти ограничения особенно важны в местах соединений в свободном пространстве, характеризующихся очень неблагоприятной концентрацией напряженности в заделке экрана.

Научные статьи

анализ поля. Таким образом LC, создаваемые механизмом ионизации (коронный разряд) только на стороне экрана CUT, собирались и направлялись через пикоамперметр. Чтобы исключить возникновение тока в конце CUT с клеммами, мы защитили его экран посредством заземленного медного электрода.

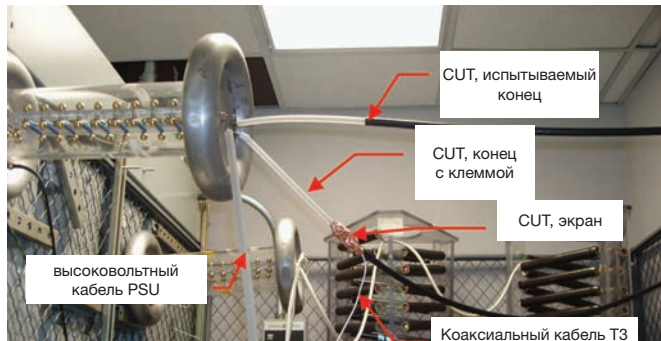


Рисунок 2. Экспериментальная установка

Испытываемые кабели

Были изготовлены несколько испытываемых образцов из кабеля 2124 Dielectric Sciences Polyethylene с изоляцией из полиэтилена (PE). Все они были приблизительно 2,5 м длиной. Их основные параметры сведены в таблице 1, а фотографии некоторых из них показаны на рисунке 3. Аббревиатурами FC и SHT обозначены ровная обрезка и усадочная трубка соответственно (использовались SHT из радиационно облученного полиолефина компании Alpha Wire Company). Полупроводниковая лента для коронозащиты VonRoll 217.21 изготовлена на основе SiC и обнаруживает нелинейное поведение. Ее проводимость возрастает в сильных полях, эффективно подавляя корону. Лента NiK 6501 компании Dielectric Sciences определена как проводящая. Однако ее удельное сопротивление оказалось слишком велико для измерений при низком напряжении с помощью цифровых вольтметров. Ее данные отсутствуют.

Таблица 1. Описание испытываемых кабелей

Обозначение испытываемых кабелей	Метод обработки конца	Длина конца l (рисунок 3d, f), см
(CUT#1)	FC, без SHT	20
(CUT#2)	FC, SHT	20
(CUT#3)	FC, SHT	14,7
(CUT#4)	Диаметр уплотнительного кольца с круглым сечением 2 мм, SHT	14,7
CUT#5	Экран отвернут на защитную оболочку, лента 217.21	14,7 см, 3 см от экрана с покрытием 217.21
CUT#6	Экран отвернут, NiK 6501	14,7 см, 3 см от экрана с покрытием лентой NiK 6501

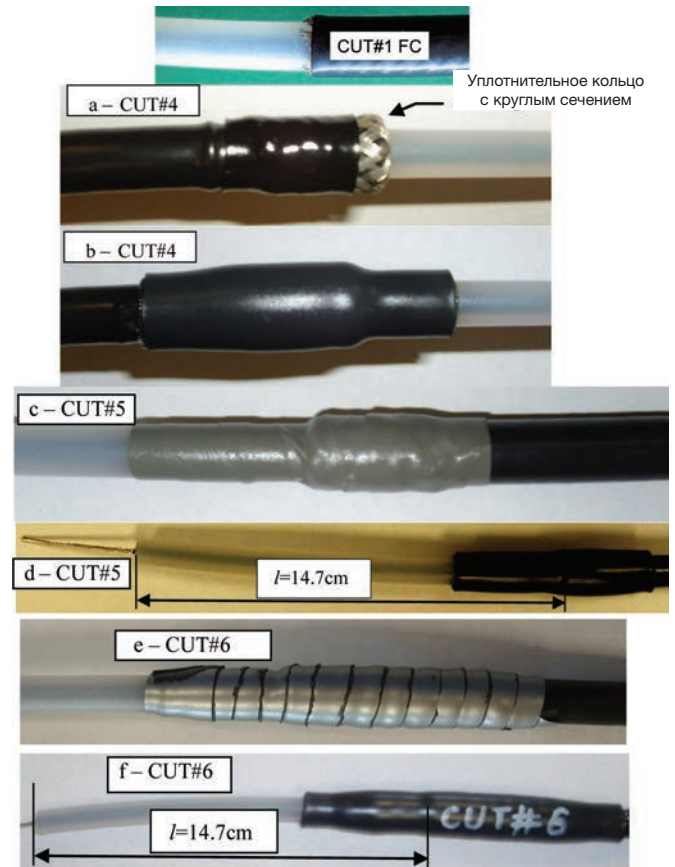


Рисунок 3. На CUT#1 видны свободно выступающие металлические нити оплетки. а) CUT#4, экран отвернут на защитную оболочку и удерживается усадочной трубкой (SHT); б) CUT#4, дополнительное покрытие SHT; в) CUT#5, экран отвернут на защитную оболочку и удерживается полупроводниковой лентой Von Roll 217.21 выходящей ~3 см на открытый полиэтилен (PE); д) CUT#5 готовый для испытания, покрытие SHT поверх полупроводниковой ленты; е) CUT#6, экран отвернут и удерживается NiK 6501 выходящей ~3 см на открытый PE; ф) CUT#6 готовый для испытания, покрытие SHT поверх ленты NiK

Методика испытаний

Для LC каждый кабель проверен с приращениями в 10 кВ вплоть до 90 кВ и с приращениями 5 кВ выше 90 кВ. CUT#6 не был проверен при отрицательной полярности. Важно отметить, что напряжение изменялось монотонно, всегда с возрастанием. Испытательное напряжение прикладывалось в течение минуты перед сбором данных LC, передаваемых из пикоамперметра Keithley в ПК с помощью программного обеспечения Keithley ExcelINX. При каждом измерении собирались и сохранялись тридцать пять значений; длительность измерения в среднем составляла 46 с. Вольт-амперные характеристики построены для средних значений.

Температура окружающего воздуха и влажность были обычно 25 °C и 60% соответственно. Их не контролировали, но маловероятно, что они значительно отличались в течение сбора данных.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

Кабели CUT#3, 4, 5, и 6 были подвергнуты испытаниям пробивного напряжения. Напряжение поднимали со скоростью приблизительно 2 кВ/с до пробоя, а затем снижали до уровня, по меньшей мере, на 20 кВ ниже зарегистрированного пробивного напряжения. Испытание повторялось от 2 до 4 раз. Принимая во внимание повреждающее воздействие на термоусадочную изоляцию и полупроводниковую ленту, их заменяли перед испытанием с противоположной полярностью. Вследствие небольшого числа проб при разрушающем испытании усреднение или иная статистическая обработка данных не применялась. Для документирования характера поверхностного перекрытия покрытие снимали на видео.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

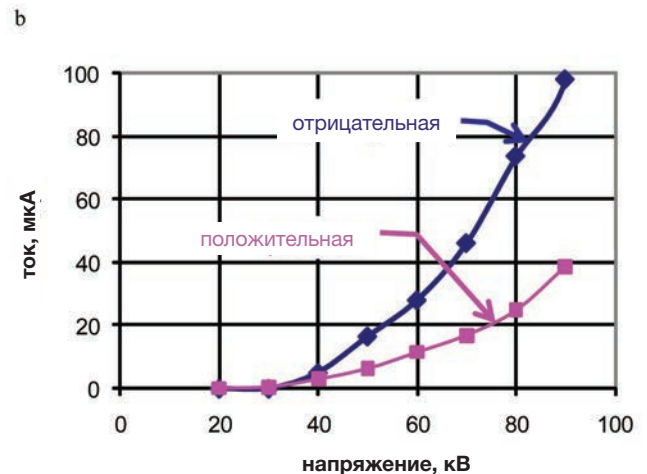
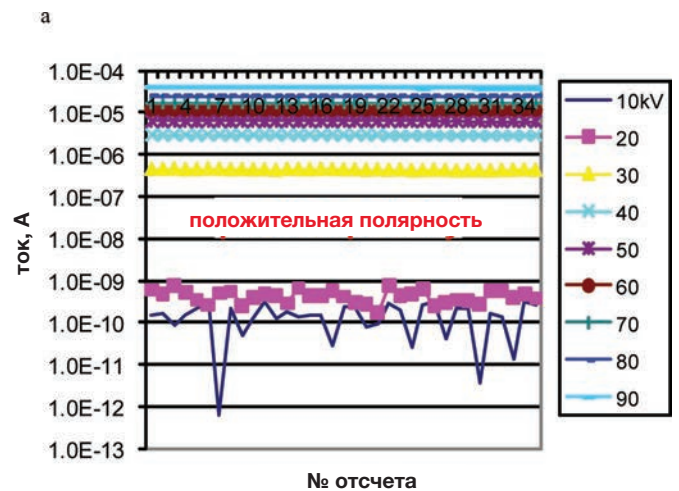
**Измерение тока утечки**

Первые измерения для получения исходных данных выполнялись на оголенном кабеле CUT#1 (FC). LC был стабилен во времени, особенно при напряжениях положительной полярности (заземленный отрицательный экран) выше 20 кВ, как показано на рисунке 4а. LC достигал 40 мкА при +90 кВ и 98 мкА при -90 кВ (рисунок 4б). С целью проверки действительного прохождения тока в кабельном экране проводился дополнительный эксперимент, в котором FC защищался электродом с относительно меньшей кривизной поверхности. При этом ток уменьшился до 3 мкА при +90 кВ. Очевидно, что ток создавался коронным разрядом.

Покрытие конца экрана материалом SHT подавило утечку на порядки (рисунок 5), особенно при положительной полярности, что также подтверждает происхождение тока утечки в месте среза экрана на испытываемом конце кабеля. Сокращение длины оголенного РЕ до  $l = 14,7$  см у CUT#3 привело к несколько большей утечке. Высота планок погрешностей на этих и подобных графиках представляет среднеквадратическое отклонение, вычисленное для всех 35 измерений. Применение кольцевой заделки конца (CUT#4) с SHT, с такой же длиной как у оголенного РЕ, обусловило падение LC на порядок по сравнению с FC CUT#3 (рисунок 6) при обеих полярностях (сравните с рисунком 5).

CUT#5 с полупроводниковой лентой и CUT#6 с лентой NiK (рисунок 7) имели самые низкие LC порядка 1 нА при 100 кВ при положительной полярности. Также токи довольно плавно возрастали с увеличением напряжения, т. е. было очень мало перегрузок пикоамперметра в диапазоне 200 нА, тогда как другие кабели можно было испытать только в диапазоне 20 мкА при 100 кВ. CUT#5 был также испытан при отрицательной полярности. LC был большим (рисунок 8), даже выше, чем у CUT#4 (рисунок 6).

Токи LC при отрицательной полярности всегда превышали токи положительной полярности. Причины этого обсуждаются в разделе «Анализ и обсуждение».



**Рисунок 4. Ток утечки (LC) для CUT#1 (ровная обрезка, без усадочной трубки).**  
а) LC в зависимости от времени (номера отсчета) при положительной полярности; б) LC в функции приложенного напряжения при положительной и отрицательной полярности

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

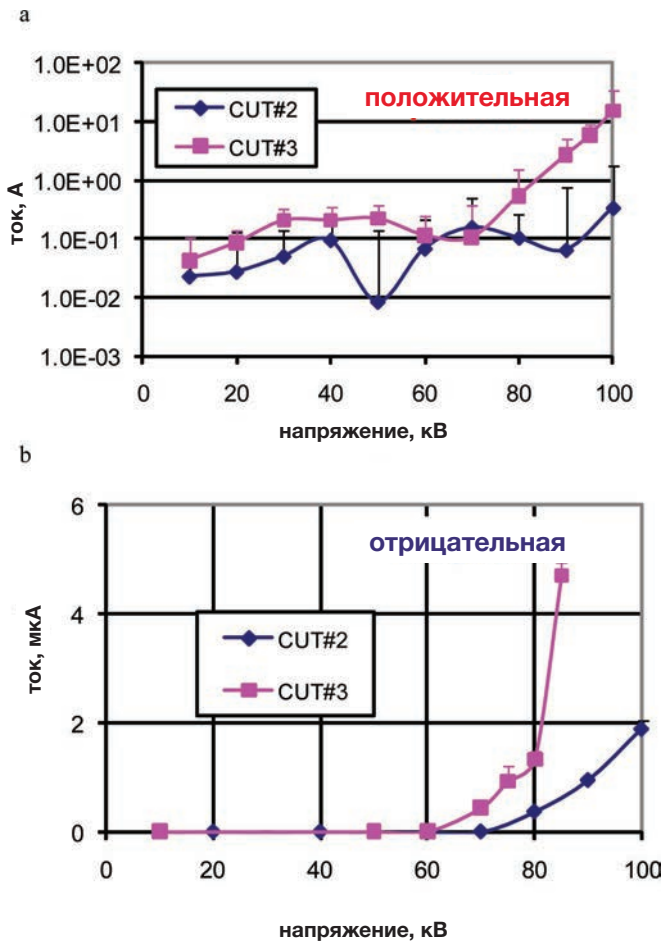


Рисунок 5. Ток утечки в функции приложенного напряжения для CUT#2 [ровная обрезка (FC), усадочная трубка (SHT),  $l = 20$  см оголенного полиэтилена] и CUT#3 (FC, SHT,  $l = 14,7$  см) при (а) положительной и (б) отрицательной полярности

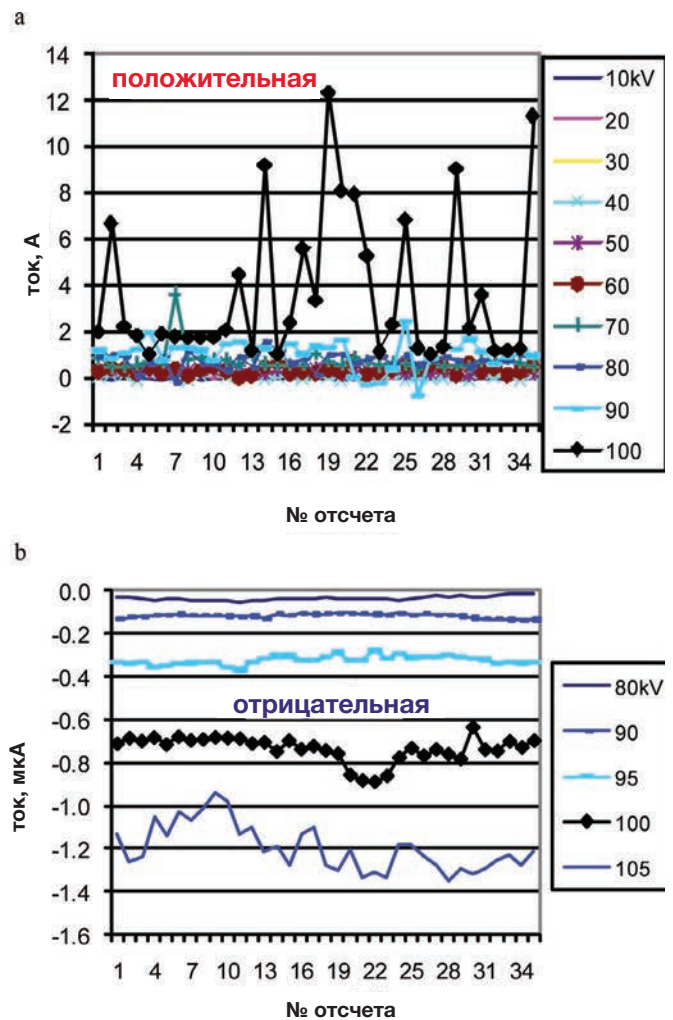


Рисунок 6. Ток утечки (LC) для CUT#4 (уплотнительное кольцо круглого сечения, усадочная трубка).

а) LC в зависимости от времени (номера отсчета) при положительной полярности; б) то же при отрицательной полярности, в) LC в функции приложенного напряжения при положительной и отрицательной полярности

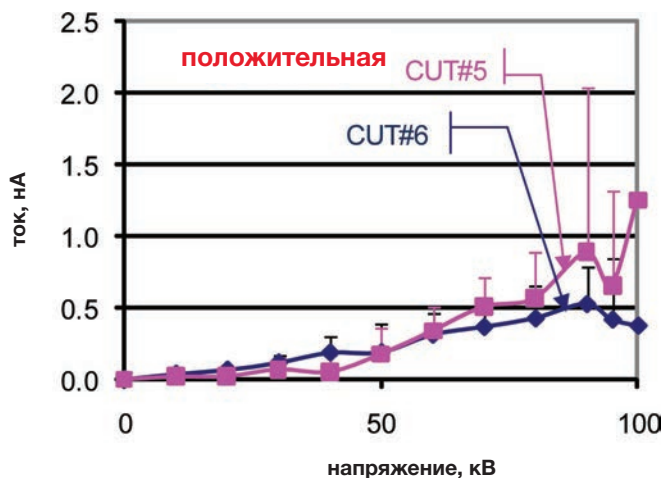


Рисунок 7. CUT#5, CUT#6. Ток утечки при положительной полярности



ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

пробой происходили при таком же напряжении, но светящийся канал закончился у конца усадочного рукава.

При отрицательной полярности пробой CUT#4 возникает на поверхности РЕ, с искровым разрядом, привязанным к уплотнительному кольцу. Первый пробой происходил при 126 кВ, последующие при 109 и 104 кВ, почти идентично случаю с положительной полярностью. Пробой CUT#5 происходил при 136 кВ после воздействия в течение ~5 с. Первое поверхностное перекрытие достигает завернутого конца экрана, что отмечено стрелкой на рисунке 11. Второй пробой происходил при том же напряжении, но формирование интенсивного коронного разряда начиналось при 80 кВ. Другие кабели при отрицательной полярности не были испытаны.

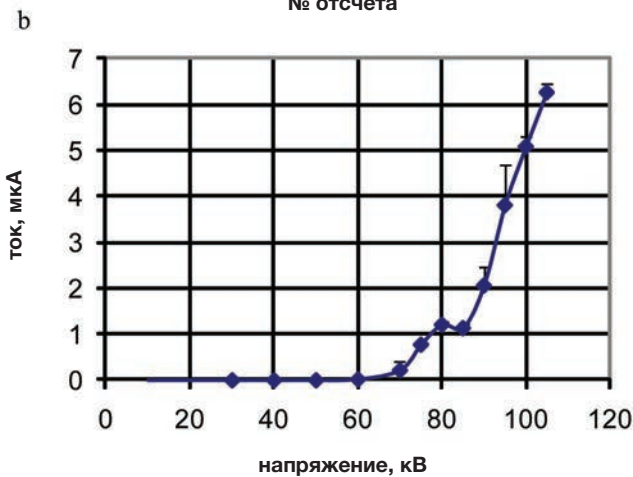
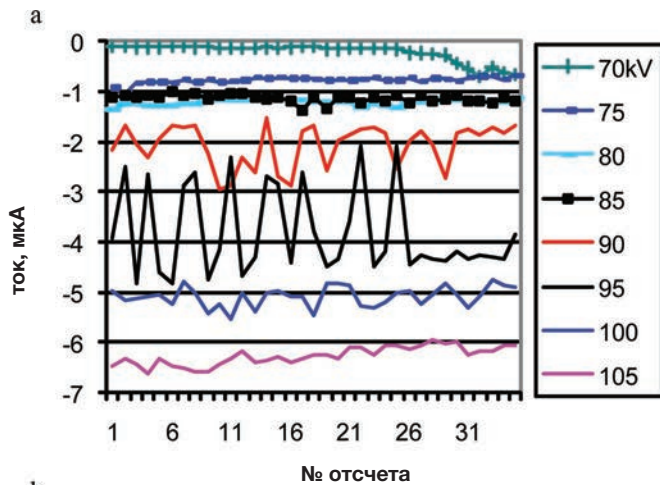


Рисунок 8. CUT#5. Ток утечки (LC) при отрицательной полярности. а) LC в зависимости от времени (номер отсчета); б) LC в функции приложенного напряжения

Испытания пробивного напряжения

Испытания проводились согласно изложенному в разделе «Методика испытаний».

При положительной полярности для CUT#3 первое поверхностное перекрытие происходило при 104 кВ по поверхности испытываемого конца. Последующие пробой (при 124 кВ) происходили по поверхности намного более длинного конца с клеммой. Изменение пути можно объяснить обработкой экрана, т. е. удалением свободных металлических нитей дугой.

Характер поверхностного перекрытия CUT#4 отличается: искровой канал соединяет экран и электрод высоковольтного делителя напряжения HVD-100 через воздух (рисунок 9). Первый пробой происходил при 124,5 кВ, последующие при 112, 113 и 117 кВ. Поведение CUT#5 и CUT#6 очень похоже, но сильно отличается от других образцов. Пробой происходил при 130 кВ после воздействия в течение ~10 с. Первое поверхностное перекрытие достигает завернутого конца экрана, что отмечено стрелкой на рисунке 10. Последовательные

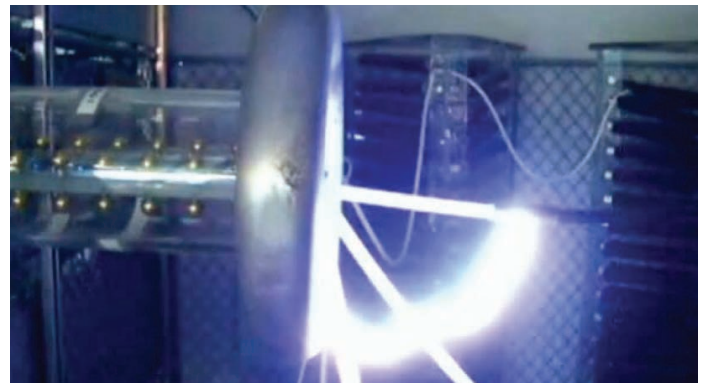


Рисунок 9. CUT#4. Фотография поверхностного перекрытия. Положительная полярность

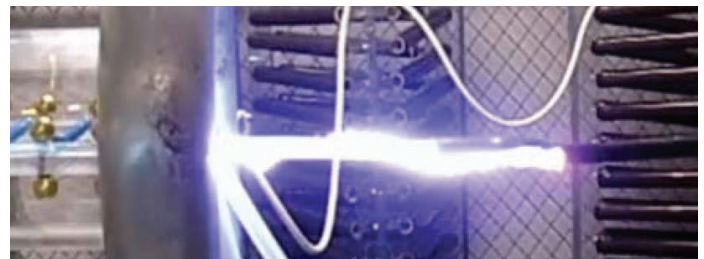


Рисунок 10. CUT#5. Фотография поверхностного перекрытия. Положительная полярность

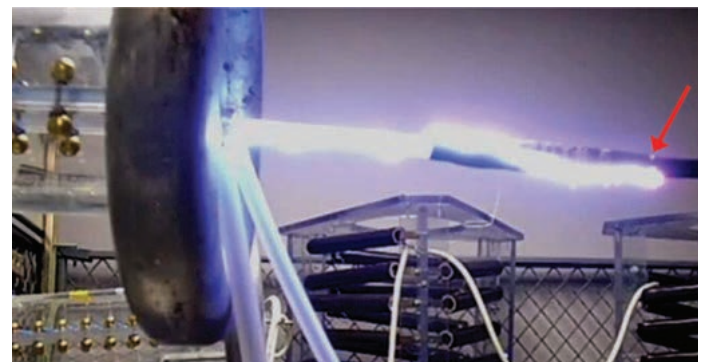


Рисунок 11. CUT#6. Фотография поверхностного перекрытия. Положительная полярность

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

сократить максимальное поле. Полупроводниковые ленты обладают одними тем же действием при обеих полярностях, подавляя ионизацию и улучшая стабильность LC.

Очевидно, что прогнозируемые анализом поля высокие поля для FC без SHT ( $E > 100$  кВ/см для обоих случаев при напряжении больше 60 кВ), приводили бы к ионизации воздуха. Это проявлено CUT#1 с незащищенным экраном и короткими (~1 мм) беспорядочно выступающими наружу свободными металлическими нитками, которые приводят к дальнейшему усилению поля. Ясно, что истекающие от экрана большие токи (рисунок 4), порождают подобный короне механизм, который можно также описать как ползущий разряд. Токи становились измеримыми при напряжениях выше 30 кВ для обеих полярностей. Масштабирование рисунка 13а до 30 кВ предлагает при этом напряжении поле 50 кВ/см, что неожиданно согласуется со значениями для полей при возникновении коронного разряда, в подобных воздушных промежутках; значения приведены на странице 153 в [13]. Сопоставив с опубликованными данными [13], [14], при таком же прикладываемом напряжении ток коронного разряда больше для положительной полярности заостренного электрода (экрана) или, в терминологии этой статьи, при отрицательной полярности. Следует также подчеркнуть, что хотя положительный коронный разряд вызывает ток больший, чем его отрицательный аналог, разница в режимах униполярного коронного разряда небольшая, интервале 20–30%. Причина в том, что подвижность положительных и отрицательных ионов в электроотрицательных газах весьма схожа. Развитие положительного стримерного коронного разряда при более высоких напряжениях в больших промежутках имеет тенденцию вызывать намного больший ток, но переходит в искровую при напряжении меньшем, чем напряжение отрицательного коронного разряда [15]. Этот эффект связан со стримерным механизмом разряда, описанным в [14] и [16].

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Система изоляции кабеля, состоящая из PE, SHT и воздуха, трудно поддается анализу по причине ее неточно определенной геометрии и нелинейных электрических характеристик некоторых материалов. Поэтому точные электрические вычисления поля трудны, если не невозможны. Однако можно наблюдать несколько общих свойств.

В системах постоянного тока токи проводимости задают распределение поля, но во время быстрых переходных процессов и в условиях переменного тока (50 Гц и выше) более важны токи смещения. Другими словами, проводимость материала доминирует при постоянном токе, а диэлектрическая проницаемость материала доминирует при переменном токе. Сейчас это хорошо известно [8]–[11].

Отличия в распространении поля можно видеть на рисунках 12, 13, и 14, созданных с помощью Ansoft Maxwell 2D Student Version [12]. Предполагаемая геометрия аппроксимирует таковую испытательной компоновки (смотрите рисунок 2). Во всех вычислениях разность потенциалов высоковольтных электродов и земли составляла 1 В. Поскольку задача линейная, результаты можно приводить к прикладываемому напряжению. Графики а и б показаны для случаев постоянного и переменного тока соответственно. Выше отношение удельного сопротивления PE и воздуха принято равным 100, и в последующем относительная удельная проводимость PE принята равной 2,25. Поле при переменном токе имеет гораздо меньшую однородность. На распределение постоянного тока в очень значительной степени влияет температурная зависимость проводимостей составляющих. Независимо от формы колебаний прикладываемого напряжения поле может быть дополнительно видоизменено процессами ионизации и уменьшено или усилено пространственными и поверхностными зарядами. При отрицательной полярности на остром электроде пространственный заряд стремится

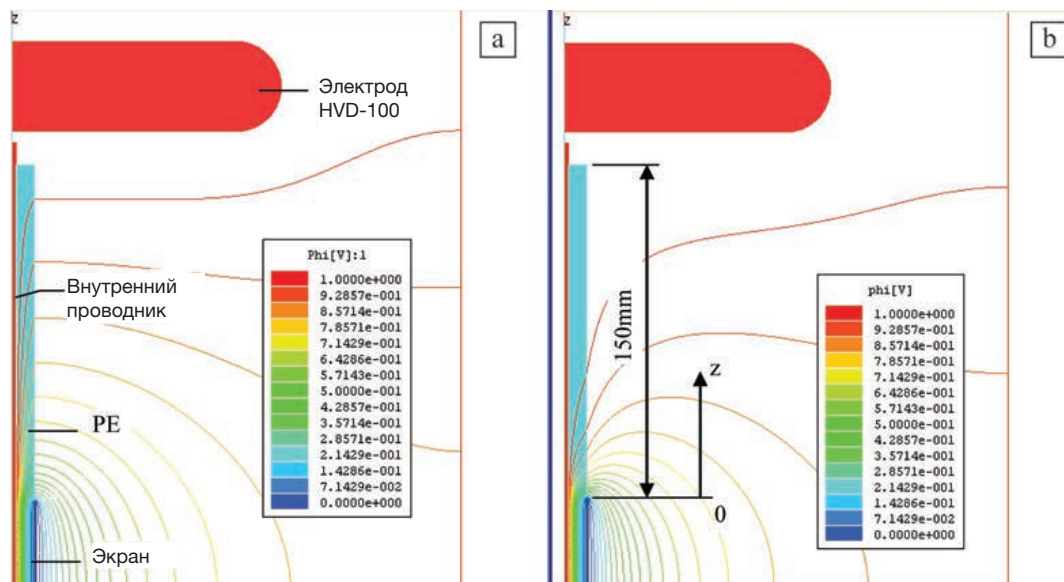


Рисунок 12. Графики поля (эквипотенциальные линии). а) поле постоянного тока; б) поле переменного тока. Разность потенциалов равна 1 В

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**
**Научные статьи**

Кольцевая заделка конца уменьшает внешнее поле и превосходит FC тем, что свободные медные нитки отсутствуют. Кольцевая заделка конца была эффективно при обеих полярностях.

При отрицательной полярности кольцевая заделка конца имеет токи LC меньше, чем у остальных образцов. Однако пробивное напряжение у CUT#5 было несколько выше, чем при заделке с использованием уплотнительного кольца. Так как были испытаны только два образца, количественное сравнение не имеет смысла. Однако характер поверхностного перекрытия для этих конструкций информативен. Для обеих полярностей поверхностное перекрытие следовало коротким путем к экрану с FC и кольцевыми заделками концов, но избирало длинный путь в случае полупроводниковой ленты и ленты NiK. Таким образом, поле в конце экрана ослабляется с помощью ленты, и поэтому пробивное напряжение выше.

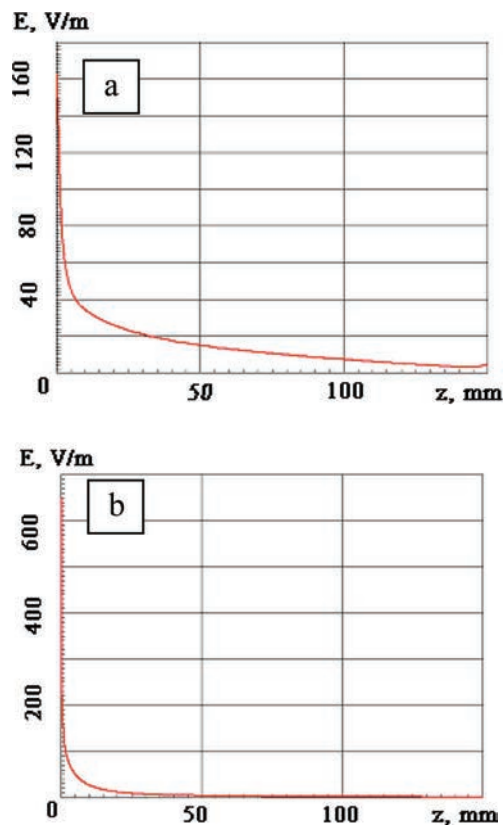
Ленты коронозащиты обладают эффектом отталкивания поля от экрана. При положительной полярности, CUT#5 и CUT#6 имеют очень устойчивые и низкие токи LC. Их пробивные напряжения были значительно выше, чем у других конструкций.

По нашему мнению, ленты коронозащиты не являются необходимыми для большинства применений с постоянным током, но предлагают основное преимущество для применений с импульсным и переменным током.

Для кабелей, снабженных SHT, токи LC при положительной полярности были на три порядка ниже, чем при отрицательной полярности. У нас нет убедительного объяснения для этого эффекта. В многочисленных публикациях рассматривается влияние диэлектрических барьеров на пробивное напряжение газовых промежутков, особенно относительно полярности, расположения барьеров, идентичности газа, его температуры и давления [13], [14], [16], [19]–[23]. Однако в них не обсуждаются токи LC.

Рассмотрим влияние пространственного заряда на механизм разряда в газовых промежутках в сильно неоднородных электрических полях. При отрицательной полярности (положительный экран) притягиваемый к экрану отрицательный пространственный заряд усиливает поле, тем самым способствуя току LC. С другой стороны, при положительной полярности такой же пространственный заряд отталкивается и рассеивается вокруг экрана, эффективно ослабляя поле и подавляя токи LC.

Как правило, в повторяющихся испытаниях пробой воздушных промежутков происходит приблизительно при таком же напряжении, при условии, что электроды не восстанавливаются, пространственный заряд, поверхностный заряд или метастабильные не накапливаются, и температура окружающей среды постоянна. Такие эффекты наблюдались при происходящих с высокой частотой повторения импульсных разрядах [24], [25]; импеданс промежутка возрастал и пробивное напряжение уменьшалось при более высоких частотах повторения. В наших измерениях пробивные напряжения при последовательных испытаниях заметно уменьшались,



**Рисунок 13. Распределение электрического поля вдоль оголенного полиэтилена, начиная от экрана кабеля.**

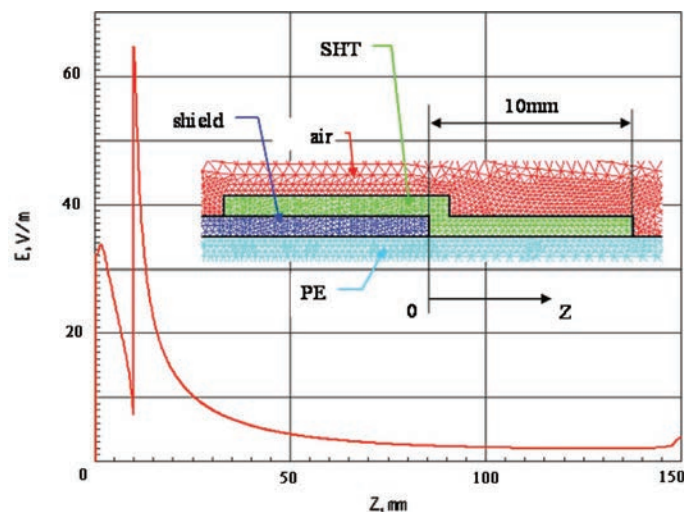
Графики а и б на рисунке 12 приведены для случаев постоянного и переменного тока соответственно

Если удельное сопротивление SHT ниже удельного сопротивления PE, поле на краю экрана значительно ослабляется (рисунок 14), ниже уровня возникновения коронного разряда. Этим можно частично объяснить резкое улучшение, которое дает покрытие SHT. Здесь мы приняли значения  $10^{14}$  Ом·м [17],  $10^{12}$  Ом·м [18] и  $10^{13}$  Ом·м для удельных сопротивлений PE, SHT и воздуха соответственно. Вевер и др. [19] приводят значение удельного сопротивления  $4 \cdot 10^{14}$  Ом·м для воздуха при стандартных условиях, но мы использовали  $10^{13}$  Ом·м, учитывая тот факт, что проводимость газа выше при отсутствии ионизации. Отметим, что термин удельное сопротивление следует применять осторожно, потому что проводимость тока ограничивается насыщением в широком диапазоне напряженности поля, расположенном ниже области возникновения ударной ионизации [14], [20], [21]. Усаживаемая трубка ослабляет поле благодаря значениям ее диэлектрической проницаемости и проводимости, но создает только незначительную ионизацию в остаточных воздушных карманах. Создаваемые таким образом заряды улавливают и нейтрализуют внешнее поле, предотвращая тем самым ионизацию и значительно снижая LC (рисунки 5 и 6). Иногда неустойчивое поведение кривых LC является, вероятно, следствием накопления и распада этих зарядов, эти процессы часто характеризуются большими постоянными времени вследствие высокого удельного сопротивления диэлектриков.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**
**Научные статьи**

заставляя предположить отличающийся механизм пробоя. В SHT после нескольких поверхностных перекрытий появились отверстия, и поэтому токи LC не подавлялись. Возможно, что при отрицательной полярности и значениях напряжения, при которых токи LC достигают нескольких микроампер, ленты SHT получают тепловые повреждения, за которыми следуют несколько поверхностных перекрытий в результате локализованных потерь мощности, оцениваемых на субваттном уровне.

В контексте концевых заделок высоковольтных кабелей сокращение и стабилизация токов LC существенна для достижения больших пробивных напряжений и большей надежности. Существуют другие важные соображения. Потребляемый от PSU ток обычно стабилен и представляет сумму тока нагрузки и различных токов LC, в том числе и этого кабеля. Представленные в этой работе данные о временном поведении токов LC позволяют оценить уровень стабильности тока нагрузки, достижимой в указанных окружающих условиях. Поэтому, если LC имеет порядок 1 нА и ток нагрузки составляет 100 нА, невозможно ожидать стабильности лучше 1 %, даже если указана стабильность PSU, равная 0,01 %. Подобные эффекты могут вызываться темновыми токами в вакуумных промежутках [26].



**Рисунок 14. Распределение электрического поля вдоль полиэтилена (PE), начиная от экрана кабеля, случай постоянного тока.** Полиэтилен, покрытый усадочной трубкой (SHT) миллиметровой толщины. На вставке показана часть геометрии сетки. Удельные сопротивления PE, SHT и воздуха находятся в соотношении 100:1:10

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Выполнены испытания токов утечки и электрической прочности для шести различных видов заделки концов экрана кабеля 2124. Ниже приведено краткое изложение основных результатов.

- (1) Рукав из усадочной трубки сильно влияет на явления ионизации, эффективно подавляя коронный разряд.

- (2) Ровная обрезка экрана оставляет свободные короткие металлические нити, которые увеличивают вероятность повреждения основной изоляции.
- (3) Отворачивание экрана назад поверх уплотнительного кольца круглого сечения уменьшает напряженность электрического поля, не оставляет свободных металлических нитей и уменьшает вероятность повреждения главной изоляции. Оно рекомендуется для применений с постоянным током.
- (4) Ленты коронозащиты уменьшают (и значительно стабилизируют) токи утечки, на уровне приблизительно 1 нА при 100 кВ и комнатной температуре. Они также увеличивают пробивное напряжение приблизительно до 130 кВ для изоляции длиной 15 см. Они рекомендуются для работы в импульсном режиме и критических применений с постоянным током.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- [1] P. N. Nelson and H. C. Hervig, "High dielectric constant materials for primary voltage cable terminations," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, no. 11, pp. 3211–3211, Nov. 1984.
- [2] J. C. G. Wheeler, A. M. Gully, A. E. Baker, and F. A. Perrot, "Thermal performance of stress grading systems for converter-fed motors," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 23, no. 2, pp. 5–11, 2007.
- [3] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines. IEEE Press, Wiley, 2004.
- [4] S. V. Nikolajevic, N. M. Pekaric-Nad, and R. M. Dimitrijevic, "Optimization of cable terminations," IEEE Trans. Power Del., vol. 12, no. 2, pp. 527–532, April 1997.
- [5] G. Lupb, K. Tucci, N. Femia, and M. Viielli, "Electric field calculation in HV cable terminations employing heat-shrinkable composites with non linear characteristics," in Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Brisbane, Australia, pp. 278–281, 1994.
- [6] J. Mackevich and J. Hoffman, "Insulation enhancement with heat-shrinkable components. Part 111: Shielded power cable," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 7, no. 4, pp. 31–40, 1991.
- [7] <http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Products/HVD.ashx>.
- [8] P. Gallagher, High Voltage: Measurement, Testing and Design. Chichester, UK: Wiley, 1983, p. 197.
- [9] A. I. Dolginov, High Voltage Engineering. Moscow: Energia, 1968.
- [10] M. S. Khalil, "International research and development trends and problems of HVDC cables with polymeric insulation," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 13, no. 6, pp. 35–47, 1997.
- [11] A. Pokryvailo, "Analyzing electric field distribution in non-ideal insulation at direct current," in Proc. Electrimacs 2008, on CD-ROM, Quebec, Canada, June 2008.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи**

**Алекс Покрывайло** родился в России, в городе Выборг. Он получил степени к.т.н. и д.т.н. в области электротехники в Ленинградском политехническом институте в Санкт-Петербурге (Россия) в 1975 и 1987 гг. соответственно. Прежде работал в Soreq NRC, Yavne, Израиль, сейчас является сотрудником Spellman High Voltage Electronics Corporation, Hauppauge, NY. Его текущие и недавние работы относятся к импульсной мощности; особое внимание уделяется сильноточным открывающим и закрывающим коммутирующим устройствам и проектированию магнитных цепей, быстрой диагностике, разработке мощных высоковольтных импульсных источников питания, и коронным разрядам. Ранее он изучал бездуговое переключение, разрабатывал элегазовую коммутационную аппаратуру, выполнил исследование в области взаимодействия пламени с электромагнитными полями и т. д. Опубликовал свыше 100 статей, два учебника (на иврите), владелец более 20 патентов, относящихся к высоковольтной технике.

- [12] Maxwell 2D Student Version, Ansoft Corp., Pittsburgh, PA, 2002.
- [13] J. M. Meek and J. D. Craggs, *Electrical Breakdown of Gases*. Oxford: Clarendon Press, 1953.
- [14] L. B. Loeb, *Electrical Coronas: Their Basic Physical Mechanisms*. Berkeley: University of California Press, 1965.
- [15] K. Parker, *Electrical Operation of Electrostatic Precipitators*. London: IEE, 2003.
- [16] Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics*. Berlin: Springer, 1991.
- [17] G. G. Raju, *Dielectrics in Electric Fields*. New York: Marcel Dekker Inc., 2003.
- [18] Shrink Tubing. Available: <http://www.alphawire.com/pages/114.cfm>.
- [19] M. Beuer, W. Boeck, K. Müller, and W. Zaengl, *Hochspannungstechnik*. Springer-Verlag, 1986, 1992. Translation to Russian 1989 (Moscow: Energoatomizdat).
- [20] E. Kuffel and W. S. Zaengl, *High Voltage Engineering*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 2000.
- [21] G. I. Skanavi, *Physics of Dielectrics: Weak-Field Region*. Moscow: Gostekhizdat, 1949, pp. 218–219.
- [22] G. I. Skanavi, *Physics of Dielectrics: Strong-Field Region*. Moscow: Fizmatlit, 1958.
- [23] V. Y. Ushakov, *Insulation of High-Voltage Equipment (Power Systems)*. Springer, 2004 (Translation from 1994 Russian ed.).
- [24] Y. Yankelevich, R. Baksht, M. Wolf, A. Pokryvailo, J. Vinogradov, B. Rivin, and E. Sher, “NO<sub>x</sub> diesel exhaust treatment using pulsed corona discharge: The pulse repetition rate effect,” *Plasma Sources Sci. Tech.*, vol. 16, pp. 386–391, 2007.
- [25] A. Pokryvailo, M. Wolf, and Y. Yankelevich, “Investigation of operational regimes of a high-power pulsed corona source with an all-solid state pulser,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 4, pp. 846–857, Aug. 2007.
- [26] A. Pokryvailo and V. Okun, “An investigation of stray currents of x-ray tubes having tubular hollow anodes,” *Instrum. Methods X-Ray Anal.*, vol. 32, pp. 120–126, 1984 (in Russian).

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи****Высоковольтный источник питания большой мощности для применений с импульсами большой длительности<sup>1</sup>**

Алекс Покрываило (Alex Pokryvailo), старший член ИИЭР, Костел Карп (Costel Carp), и Клифф Скапеллати (Cliff Scapellati)

**Аннотация.** В статье описаны концепция и физическая демонстрация недорогого компактного высоковольтного (100 кВ) источника питания (HVPS) большой мощности (100 кВт), разработанного для применений с импульсами большой длительности (от единиц миллисекунд до постоянного тока). Ключевая технология включает высоковольтный модульный преобразователь с инверторами дозирования энергии, работающими на частоте приблизительно 50 кГц, и демонстрирует КПД 97,5 % в широком диапазоне рабочих условий. Выходные напряжения инверторов сдвинуты по фазе, что позволяет получить низкие пульсации 1 % и скорость нарастания выходного напряжения 3 кВ/мкс с запасаемой энергией меньше 10 Дж при максимальном напряжении. Модульная конструкция позволяет легко подстраивать высоковольтный источник питания для определенных потребностей. Благодаря высокому КПД отсутствует необходимость применения водного охлаждения, что позволяет получить небольшие размеры. Средства управления обеспечивают стандартные эксплуатационные свойства и расширенные цифровые возможности вместе с простотой выполнения специальных требований применения. Подробно описаны конструкция и испытания высоковольтного источника питания. Показано, что коэффициент пульсаций обратно пропорционален квадрату числа модулей. Экспериментальные и формы колебаний тока и напряжения показывают коммутацию, осуществляемую практически без потерь для изменяющейся нагрузки в широком диапазоне входного линейного напряжения и хорошее согласование с моделями цепи. Общий КПД достигает 95 % при полной нагрузке и более 90 % при 20-процентной нагрузке, с коэффициентом мощности, обычно превышающим 93 %.

**Ключевые слова:** силовая электроника, импульсная энергетика, резонансный преобразователь, умножитель напряжения, пульсации напряжения.

**I. ВВЕДЕНИЕ**

В области импульсной энергетики наука и технология накопили множество средств генерации импульсов в широком диапазоне параметров, с продолжительностью от пикосекунд до секунд при уровнях энергии, для самых коротких импульсов простирающихся вплоть до тераватт. Недавняя книга Месяца [1] может служить

<sup>1</sup> Рукопись получена 22.09.2009 г.; переработана 04.01.2010 г.; принята 25.02.2010 г.. Дата публикации 12.04.2010 г.; дата текущей версии 08.10.2010 г.

Авторы являются сотрудниками компании Electronics Corporation, Hauppauge, NY 11788 USA (эл. почта: Apokryva@spellmanhv.com; scarp@spellmanhv.com; cliff@spellmanhv.com). Цветные версии одного или нескольких рисунков из этой статьи доступны по ссылке <http://ieeexplore.ieee.org>.

Идентификатор цифрового объекта 10.1109/TPS.2010.2044810

энциклопедией по этому предмету. С акцентом на прямоугольных импульсах продолжительностью от миллисекунд до секунды, повсеместных в компьютерной томографии, источниках РЧ, ионной имплантации и т. п., в самых общих методах применяются цепи формирования импульсов (PFN) или источники питания постоянного тока с автомодуляцией или с высоковольтными переключателями для модуляции уровня выходного напряжения. Ясно, что схемы формирования импульсов лучше удовлетворяют требованиям к генерации коротких импульсов, и модуляция постоянного тока является единственным практическим средством формирования длинных импульсов продолжительностью от нескольких миллисекунд до нескольких секунд и с быстрыми переходами. Мы относим к категории цепей формирования импульсов отдельный накопительный конденсатор с полностью управляемым переключателем выходного напряжения и системы индуктивного накопления энергии [2], [3].

Способность обеспечивать быстрое время нарастания выгодно также в применениях для электростатического осаждения. Свойственной работе электростатического осаждения сильное искрение приводит к частым провалам напряжения, и быстрое восстановление питания улучшает эффективность сбора [4], [5]. Это справедливо и в случае прерывистого возбуждения.

Типичным требованием для высоковольтных источников питания постоянного тока, в том числе для применений с импульсами большой длительности, является снижение отдачи запасаемой энергии ниже определенного уровня при одновременном соответствии противоречивому требованию поддержания насколько возможно низких пульсаций напряжения. Наиболее многообещающим подходом для выполнения этих условий в экономическом отношении являются высокочастотные многофазные топологии в различных воплощениях. Замкнутые контуры обратной связи, в принципе, могут обеспечить жесткое регулирование и компенсацию для вариаций линейного напряжения, например, провалов и пульсаций с частотой, кратной частоте питающей сети, хотя не так просто обеспечить чистые и быстрые переходы без перерегулирования и высокую стабильность на уровне постоянного тока. Для реализации высокого КПД почти повсюду в части преобразователя используют резонанс, чтобы избежать потерь на переключение. Теория и практика таких преобразователей хорошо известны [6], [7]. Системы очень большой мощности разрабатывают на основе высоковольтных трехфазных трансформаторов с отдельными или общими сердечниками [8]–[10], обычно работающих на частоте 20 кГц. Естественным способом регулирования тока и (или) напряжения в таких преобразователях является частотное регулирование.

Мы отдаем предпочтение модульному подходу с использованием нескольких отдельных трансформаторов со смещением по фазе, снабжаемых собственной выпрямляющей цепью [11], [12]. Такая система имеет гибкую и открытую конструкцию с возможностью выбора требуемого числа фаз для подавления пульсаций. В настоящей статье расширена эта концепция и описана физическая демонстрация недорогого компактного высоковольтного (100 кВ) источника питания большой мощности (100 кВт) со сверхвысоким КПД, разработанного для применений с импульсами большой длительности. Эта концепция также пригодна для рынка электростатического осаждения и тому подобных.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Научные статьи

### II. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Этот раздел дает краткое представление для последующего материала, предлагая обзор характеристик, которые направляли разработку и в значительной степени выполнены или перевыполнены. Внимание сосредоточено на динамических характеристиках в сочетании с высокой мощностью. Основные технические характеристики следующие:

- 1) средняя выходная мощность: 100 кВ в диапазоне выходного напряжения 90–100 кВ; снижается при низком напряжении;
- 2) динамическая характеристика: скорость нарастания выходного напряжения не меньше 100 кВ/мс (заданное напряжение от 5 % до 95 %); типичное значение 300 кВ/мс;
- 3) Составляющая высокочастотной пульсации, размах: (p-p): типовое значение 1 % при 100 кВ на полной мощности;
- 4) передаваемая на выход запасенная энергия: < 10 Дж;
- 5) частота преобразования: 50 кГц;
- 6) входное напряжение: трехфазное 400 В пер.  $\begin{matrix} +10\% \\ -14\% \end{matrix}$ ;
- 7) КПД по мощности: типовое значение > 95 % на полной мощности: при 100 кВ; > 90 % при 20 кВ;
- 8) полная масса: < 250 кг; объем масла меньше 60 л.

### III. КЛЮЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Высоковольтный источник питания построен на основе высоковольтного модульного преобразователя (рис. 1). Питание всех модулей преобразователя  $M_1-M_N$  осуществляется от общего входного выпрямителя (IR). В состав модулей входят инверторы  $INV_1-INV_N$ , питающие трансформаторы HV  $T_1-T_N$ , которые питают умножители напряжения  $R_1-R_n$  с  $M$  ступенями умножения, напряжения которых суммируется их выходами постоянного тока. Такую топологию можно назвать «индуктивным сумматором». Для номинальных значений 100 кВ и 100 кВт  $N = 4$  и  $M = 3$ . Каждый модуль построен для обеспечения средних значений 25 кВ и 25 кВт и имеет высокопотенциальную изоляцию вторичной обмотки трансформатора с номиналом  $3 \cdot 25$  кВ пост. тока = 75 кВ пост. тока. Эта изоляция, вместе с остальными компонентами (главным образом высоковольтные конденсаторы), должны также выдерживать кратковременные переходные напряжения, возникающие в процессе генерирования импульсов. Число таких переходных процессов определяется характером работы высоковольтного источника питания. В применениях для электростатического осаждения, например, число импульсов в течение срока службы определяется интенсивностью искрения. Если последняя составляет 6 искр/мин, число импульсов может значительно превосходить 10.

Представленная на рисунке 1 топология предложена и частично изучена очень давно [11], [12]. Она позволяет снизить число ступеней умножителя и номинальные значения напряжения высоковольтного трансформатора. Первое улучшает коэффициент уплотнения (соотношение напряжений

на первой и следующей ступенях умножителя) и значительно сокращает запасаемую энергию. При  $M = 3$  трансформаторы и платы умножителей имеют номинал 8,5 кВ, что упрощает их конструкцию и значительно сокращает электрический износ изоляции, вызываемый высокочастотными компонентами напряжения. Сдвиг фаз выходных напряжений инверторов позволяет уменьшить пульсации на выходе и дополнительно снизить запасаемую энергию. При таком подходе затраты средств и времени на разработку снижаются; отметим, что после разработки одного модуля (в том числе его основной изоляции) преобразователь в целом реализуется в виде простой комбинации требуемого числа модулей, которые можно соединять последовательно или параллельно. Недостатком способа является большое количество составных частей и необходимость высокопотенциальной основной изоляции, которая не требуется в обычных умножителях Кокрофта-Уолтона. Однако электрический износ этой изоляции обусловлен главным образом напряжением постоянного тока, и поэтому старение происходит значительно медленнее по сравнению со старением, вызываемым напряжением ВЧ (десятки килогерц) [13]. При работе в импульсном режиме основная изоляция также подвергается воздействию импульсных напряжений.

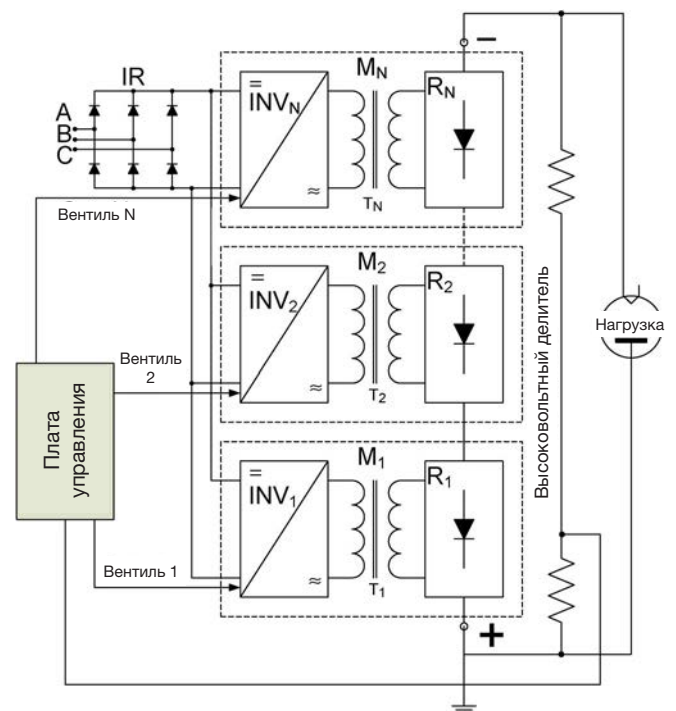


Рис. 1. Структурная схема высоковольтного источника питания

### A. Подавление пульсаций

Мы будем определять коэффициент подавления пульсаций  $K$  в виде отношения пульсаций  $V_{Nns}$  высоковольтного источника питания, состоящего из  $N$  работающих синфазно модулей, к пульсациям  $V_{Ns}$  в случае  $N$  модулей, работающих со сдвигом фазы. Пульсации можно рассматривать в виде напряжения размаха высокочастотной составляющей переменного тока

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Научные статьи

или представить в процентах от составляющей постоянного тока. Ради простоты здесь примем, что выпрямленное напряжение модуля представлено наложением составляющей постоянного тока и абсолютной величиной синусоидального колебания.

Коэффициент подавления пульсаций легко вычисляется; он показан в графическом виде на рис. 2. Показано, что для анализируемого случая  $K$  пропорционален  $N^2$ . Для пульсаций с произвольной формой колебаний эта зависимость сложнее. В общем  $K$  можно оценить с помощью формулы  $K = \alpha \cdot N^\beta$ , где в зависимости от формы колебаний коэффициент  $\alpha \approx 1 \div 1,3$  и показатель степени  $\beta = 1 \div 2$ . Для выпрямленных синусоидальных колебаний  $\alpha \approx 1,3$  и  $\beta = 2$ , как показано на рис. 2, тогда как для пилообразной формы пульсации определяется, например, функцией  $v(t) = -t + \text{ceil}(t)$ ,  $\alpha = 1$  и  $\beta = 1$  (это утверждение можно также легко проверить графически).

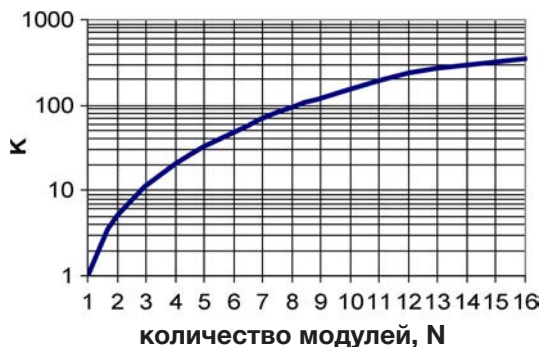


Рис. 2. Коэффициент подавления пульсаций

Если коэффициент пульсаций задан, сдвиг фаз дает снижение выходной емкости, запасаемой энергии и времени нарастания приблизительно от  $N$  до  $N^2$ . Поэтому описанная многоячеечная концепция позволяет оптимизировать высоковольтный источник питания в пространстве вышеуказанных параметров.

### В. Конструкция отдельного модуля

Ячейки преобразователя выстраиваются вокруг полумостовых дозирующих энергию квазирезонансных инверторов (рис. 3). Принцип действия, теория работы, преимущества и недостатки описаны в другом источнике [14] (см. также сопроводительную статью [15] и ее ссылки), и здесь расширенное описание не приводится.

Инверторы работают на частоте приблизительно 50 кГц при полной нагрузке с практически нулевыми потерями на переключение. Индуктивность рассеяния высоковольтных трансформаторов полностью включена в резонансный контур; поэтому внешние дроссели не требуются. За исключением снижения количества составных частей и стоимости, эта особенность чрезвычайно выгодна для выбранной многоячеечной резонансной топологии, так как образцы обладают хорошей повторяемостью индуктивности рассеяния, которая определяется магнитным потоком, концентрирующимся вне пределов ферромагнетиков, и практически не зависит

от температуры. Паразитная емкость трансформатора имеет большие технологические допуски. Она также более чувствительна (чем индуктивность рассеяния) к взаиморасположению трансформатора и выпрямителя. Однако эти факторы могут влиять на напряжение, распределяемое между модулями только в случае отсутствия нагрузки, и правильным выбором частоты преобразования это влияние можно полностью исключить [16].

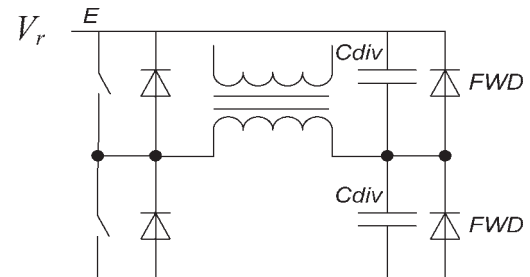


Рис. 3. Полумостовой инвертор с конденсаторами дозирования энергии.  $V_r$  означает напряжение питания шины постоянного тока

### С. Управление

Плата управления расположена рядом с программируемой пользователем вентильной матрицей. Она обеспечивает стандартные эксплуатационные свойства и расширенные цифровые возможности вместе с простотой выполнения специальных требований применения. Стандартные функциональные возможности включают многократную защиту (от искры/короны, перегрева, перегрузки по току и напряжению, дугового разряда и т. п.) и средства задания значений напряжения и тока. Регулирование на выходе выполняется посредством частотного регулирования и осуществляется в цифровом виде с помощью программируемой пользователем вентильной матрицы, формирующей интервалы проводимости транзисторов для реализации бестокового переключения. Таким образом потери на переключение практически исключаются, что позволяет использовать относительно медленные недорогие транзисторы с низким напряжением насыщения; последнее также улучшает КПД инвертора.

Петля обратной связи, получающая управляющий сигнал от прецизионного широкополосного встроенного высоковольтного делителя, оптимизирована для быстрых переходов с минимальным или нулевым перерегулированием (см. экспериментальную часть далее) и жесткой стабилизации после установления напряжения. Отметим здесь, что в среде PSpice разработаны модели высоковольтных источников питания для полного диапазона. Они адекватно воспроизводят все характерные особенности работы высоковольтных источников питания, в том числе паразитные составляющие в высоковольтной части, механизм сдвига фаз, цепь обратной связи, и т. п., помогая и при разработке, и при интерпретации экспериментальных данных.



## IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### A. Средства измерений и методы эксперимента

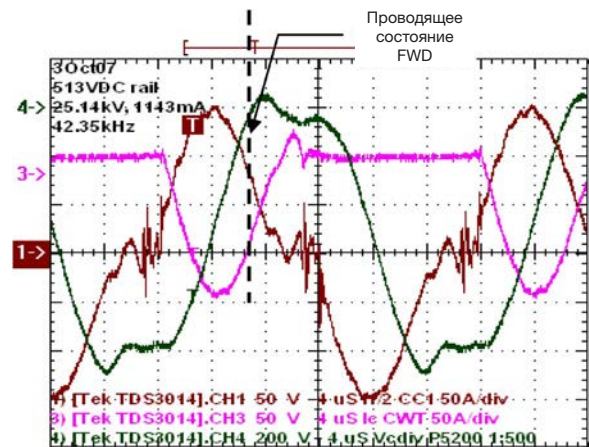
Для измерений тока ВЧ применялись специально изготовленные в мастерской трансформаторы тока с чувствительностью 0,01 В/А (далее в тексте обозначаются как СС1) и зонды Rogowski, модель CWT15 производства PEM [17]. Последние также использовались для калибровки СС1. Высокоточный делитель Spellman (модель HVD100 [18]) служил для измерений высокого напряжения постоянного тока. Модифицированная и снабженная компенсацией калиброванная версия, имеющая обозначение HVD100C, использовалась для измерений во время переходных процессов. Ее время нарастания меньше 2 мкс. Контроль пульсаций осуществлялся с помощью специального устройства контроля пульсаций, состоящего из включенных последовательно разделительного конденсатора и резистора [19], напряжение на котором измерялось с помощью зонда P6015A Tektronix. Хотя при работе с постоянным током пульсация не превышала 1 кВ, такой высоковольтный зонд был необходим для работы со значительно большими переходными напряжениями во время включения. Измерения плавающего напряжения выполнялись с помощью дифференциального зонда Tektronix P5200. Специальный нелинейный делитель (изготовлен в мастерской) использовался для измерений напряжений насыщения на полупроводниковых переключателях [20]. Измерения мощности [КПД и коэффициента мощности (PF)] выполнялись с помощью измерителя мощности Volttech, модель PM300. Контроль температуры осуществляется с помощью термопар, соединенных с регистратором данных (Agilent, модель 34970A) с поддержкой программного обеспечения BenchLink.

Регулирование напряжения входной линии в испытаниях с одним модулем при уровне энергии меньше 30 киловатт осуществлялось вручную посредством трехфазного автотрансформатора. Поэтому входное напряжение можно было постоянно корректировать. На высокой мощности использовался работающий на частоте линии трехфазный трансформатор с переключаемыми отводами. Это позволило моделировать случаи с низким, номинальным и высоким входным линейным напряжением. Последнее было нестабилизированное и несколько различалось при измерениях. В точке измерений измерялось напряжение шины постоянного тока  $V_r$ . Значения последнего в этой статье соответствуют вышеупомянутым случаям и определяются в виде диапазонов от 460 до 480 В, от 510 до 530 В и от 580 до 600 В для низкого, номинального и высокого входных линейных напряжений соответственно. Вариация  $V_r$  от 460 до 590 В соответствует трехфазному линейному напряжению 400 В пер. +10%/-14%, которое является фактором, определяющим падение напряжения в ИР.

### B. Испытания отдельного модуля

Типичные формы колебаний, показанные на рис. 4, указывают на хорошую резонансную коммутацию без токов переключения в полном диапазоне входных напряжений линии, и хорошее согласование с моделями PSpice. На этом

и последующих рисунках на приложенных надписях указаны условия испытаний, типы используемых зондов, разрешение по горизонтали и вертикали и т. п. Первичная обмотка была разделена на две части, соединенные параллельно, коммутация каждой из них осуществлялась транзисторной сборкой, отсюда пометка «разделен надвое» в подрисуночном тексте этого и следующих рисунков. Пунктирной линией показано начало проводящего состояния FWD. При низком линейном напряжении диоды FWD вообще не проводят. Эти измерения выполнены с использованием БТИЗ Powerex CM300DC-24NFM. Потери мощности были оценены в 50 Вт на транзистор, тепло легко отводилось с помощью радиаторов воздушного охлаждения с перегревом в наиболее тяжелых условиях меньше 40 °С относительно окружающего воздуха. Методы измерений потерь мощности и вычисления подробно изложены в [20].



**Рис. 4. Номинальное линейное напряжение**  
 $P = 28,7$  кВт (Развертка 1) ток первичной обмотки (разделен надвое). (Развертка 2) ток коллектора (разделен надвое). (Развертка 3) напряжение на резонансных конденсаторах. Проводящее состояние FWD вправо от пунктирной линии

Особое внимание уделено определению потерь в высоковольтном трансформаторе и умножителе. Это послужило ключом к конструкции высоковольтного бака. С этой целью выполнены calorиметрические измерения потерь высоковольтных составляющих модуля преобразователя. КПД преобразователя оценен в 97,5%; поэтому проектировался общий КПД высоковольтного источника питания 95%. Учитывая высокий ожидаемый КПД, решено принять схему полностью воздушного охлаждения без каких-либо теплообменников.

### C. Испытания высоковольтного источника питания

Лабораторный высоковольтный источник питания собран на тележке, как показано на рис. 5. Он состоит из трех главных узлов: защищенный автоматическим выключателем выпрямитель линейного напряжения (самый тяжелый узел), секция инверторов и герметичный маслonaполненный высоковольтный бак. Последний имеет массу 109 кг и содержит не больше 60 л масла. Отметим, что в этой статье основное внимание уделено части преобразователя; оптимизация линейного выпрямителя в отношении размера и стоимости не выполнялась.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

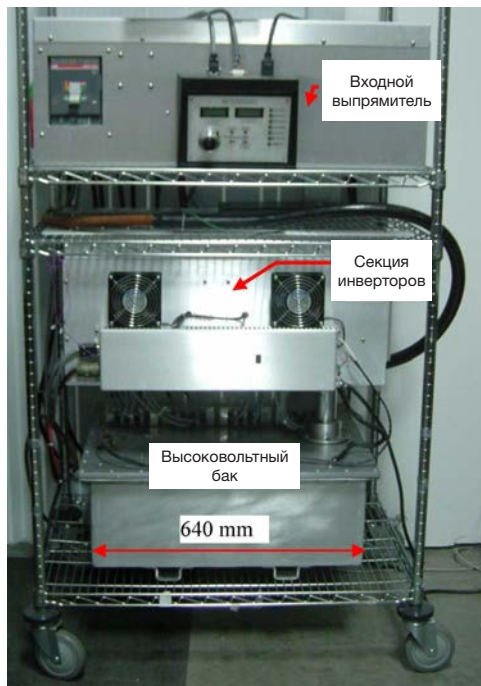


Рис. 5. Лабораторные высоковольтные источники питания

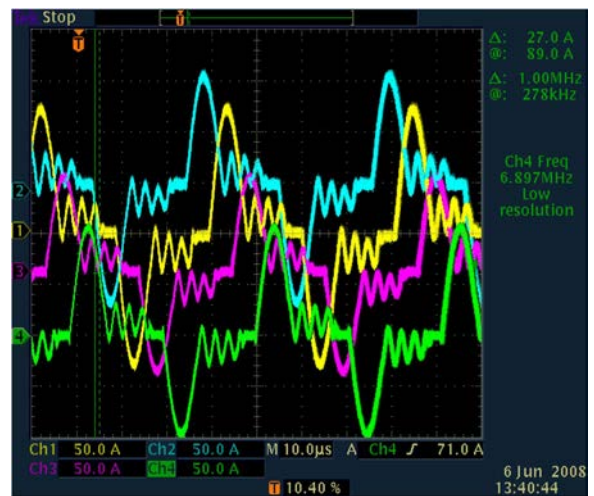


Рис. 7. То же, что на рис. 6, при 100 кВ и 50 киловатт. Низкое линейное напряжение: 400 В пер. -14 % (345 В пер.)

Выполнены разносторонние испытания высоковольтного источника питания на резистивной нагрузке. На рис. 6 и 7 показаны типичные сдвинутые по фазе токи первичной обмотки (разделены надвое) при 100 кВт и 50 кВт соответственно. Колебания после броска тока сети возникают вследствие резонанса между индуктивностью рассеяния и паразитной емкостью трансформаторов. Отметим отсутствие импульса тока «обратного выброса»; последний характерен для правильных схем с последовательным резонансом при небольшой нагрузке.

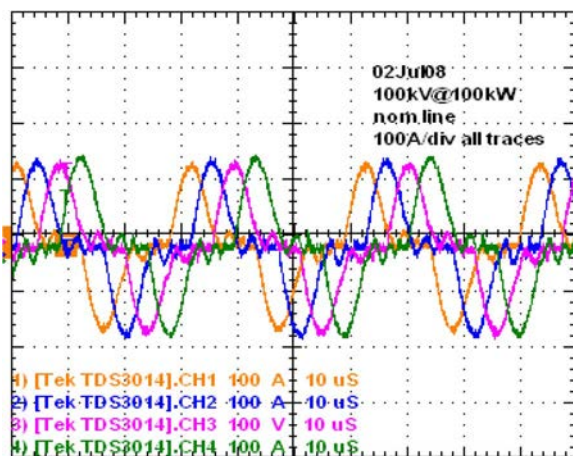


Рис. 6. Сдвинутые по фазе на  $\pi/4$  токи первичной обмотки (разделены надвое) при 100 кВ и 100 киловатт. Номинальное линейное напряжение: 400 В пер.

Так как использована схема двухполупериодного выпрямления, сдвиг фазы между токами обмоток трансформатора равен  $\pi/4$ . Вычисления PSpice прогнозировали пульсацию выходного напряжения 0,223 % (размах) с паразитной (выходной) емкостью  $< 2$  нФ для наихудшего случая высокого линейного напряжения (рис. 8).

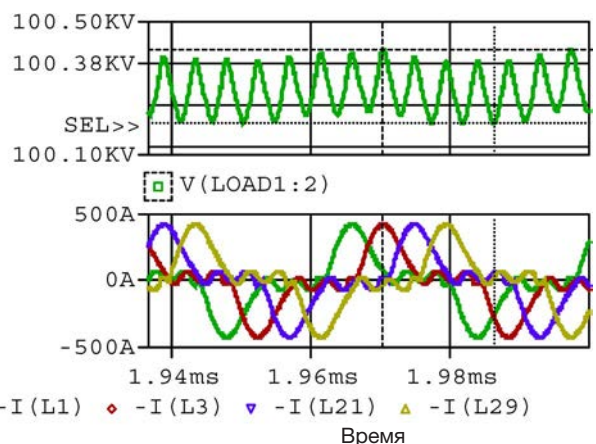


Рис. 8. Моделирование высоковольтной цепи. Высокое линейное напряжение  $V_L = 580$  В. Пульсация: 0,223 % (размах) PF = 0,943. Экспериментальный PF = 0,946 (см. рис. 11)

Измеренная пульсация в грубом приближении вчетверо больше и имеет низкочастотную основную составляющую (рис. 9). Появление последней можно объяснить асимметрией синхронизирующих сигналов, неравенством паразитных емкостей, разбросом данных обмоток, неидеальной обратной связью и т. п. Подобное явление наблюдалось в [12]. Упомянутые выше имитации обеспечивают также значение PF 0,943, близкое к экспериментальным результатам. Отметим, что формы колебаний пульсации не являются выпрямленной синусоидой или пилою; однако они ближе к первой форме; поэтому значение для показателя в (4) можно принять  $\beta = 2$ . Это подтверждено многочисленными измерениями

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

и моделированием в широком диапазоне импеданса нагрузки и выходного напряжения. К тому же, плохая обратная связь может сильно влиять на подавление пульсаций за счет сдвига фаз.

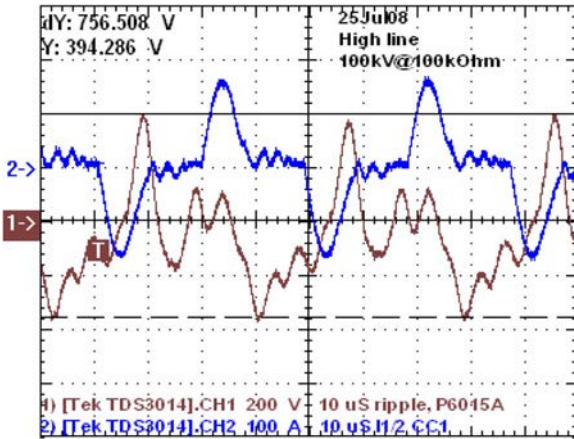


Рис. 9. Пульсация при 100 кВ, нагрузка 100 кОм, равна 0,76 % (размах). Высокое линейное напряжение

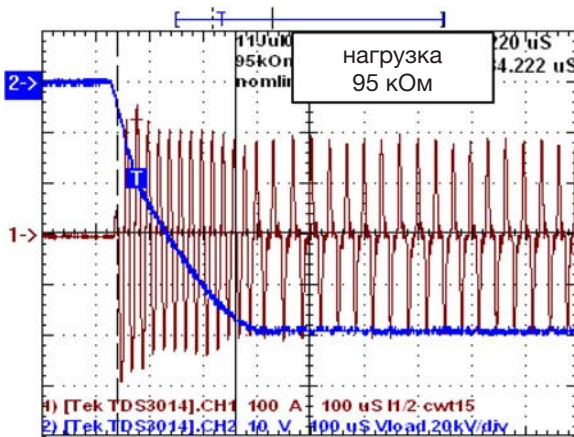


Рис. 10. Время нарастания для нагрузки 95 кОм при номинальном линейном напряжении. (Развертка 2) напряжение нагрузки: 20 кВ/дел. (измерено специальным делителем напряжения с компенсацией). (Развертка 1) ток первичной обмотки (разделен надвое). 100 А/дел.

Учитывая большой запас номинального напряжения высоковольтных трансформаторов и низкую пульсацию, динамическая характеристика высоковольтного источника питания показывает исключительное быстродействие: время нарастания от нуля до полного выходного напряжения обычно меньше 250 мкс (рис. 10), в зависимости от напряжения линии. Динамические характеристики в режиме дозирования энергии можно проанализировать с высокой точностью, используя [14]

$$V_i(t) = 2V_r \sqrt{\frac{C_{div}}{C_s} ft} \quad (1)$$

где все переменные и параметры приведены к одной стороне трансформатора;  $t$  — время,  $f$  — частота преобразования, и  $C_s$  — полная емкость модуля умножителя и нагрузки.

Если частота изменяется в течение зарядки, модели PSpice обеспечивают лучшую точность. Очевидно, что время нарастания, полученное согласно (1), запасаемая выходная энергия и коэффициент пульсаций обратно пропорциональны  $C_s$ . Поэтому, допуская равный 2 % коэффициент пульсаций при полном напряжении и полной мощности, время нарастания можно уменьшить до значения не более 100 мкс. Отметим, что время нарастания практически не зависит от нагрузки, так как ток нагрузки на порядок меньше тока зарядки конденсаторов умножителя.

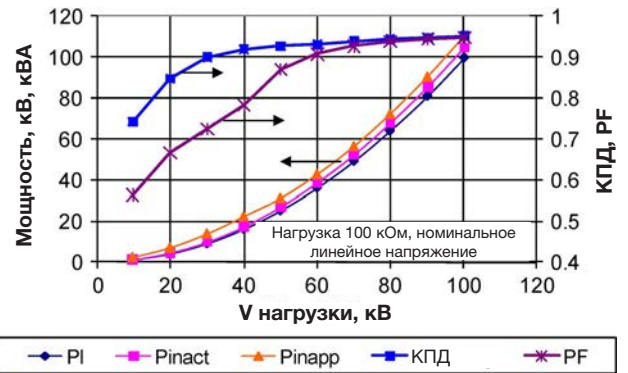


Рис 11. Кажущаяся (Pinapp) и активная (Pinact) входные мощности, мощность нагрузки (PI), КПД, и PF при номинальном линейном напряжении для нагрузки 100 кОм

На рис. 11 показаны экспериментальные данные силовых измерений, полученные при номинальном линейном напряжении. В соответствии с моделями и информацией, полученной при работе с отдельным модулем, общий КПД равен 95 % при полной нагрузке и больше 90 % при нагрузке 20 %. PF был также удовлетворительно высоким. При высоком и низком линейном напряжении результаты измерений очень похожи. При большем сопротивлении нагрузки КПД и PF были практически такими же (рис. 12).

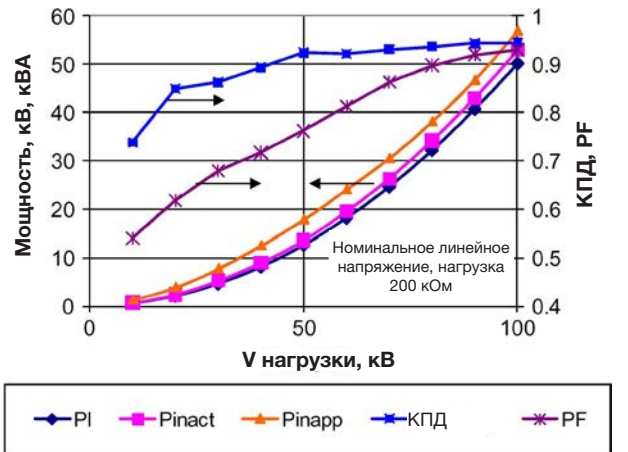


Рис 12. То же, что на рис. 11, для нагрузки 200 кОм

Продолжительные измерения при 100 кВ были выполнены вплоть до уровня энергии 100 кВт (средняя продолжительная

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

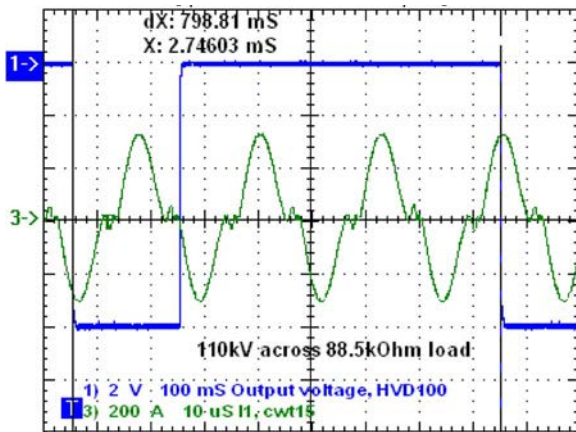
### Научные статьи

мощность). С целью определения перегрузочной способности высоковольтный источник питания также работал с тремя модулями при 88,4 кВ, 90 кВт и в импульсном режиме (см. следующее). Наблюдался стабильный перегрев основных компонентов высоковольтного источника питания. Для номинального линейного напряжения результаты сведены в Таблице I.

**Таблица I. Перегрев основных частей высоковольтного источника питания, °C**

Мощность нагрузки, кВт	Монтажная плата транзисторов:	Монтажная плата диодов FWD	Высоковольтный бак (маслонаполненный резервуар)
100 (4 модуля)	25	23	42
90 (3 модуля)	27	10	38

Также выполнены испытания высоковольтного источника питания в импульсном режиме, главным образом с целью валидации срока службы основной изоляции. Вырабатываемый высоковольтным источником питания прямоугольный импульс 110 кВ с периодом 0,8 с и длительностью импульса 0,2 с на нагрузке 88,5 кОм, что соответствует пиковой мощности 137 кВт и средней мощности 34 кВт соответственно (см. рис. 13). Ко времени написания этой статьи всего выполнено  $1,1 \cdot 10^6$  импульсов.



**Рис 13. Работа с импульсами большой длительности: 110 кВ, пиковая мощность 137 кВт и средняя мощность 34 кВт.**

(Развертка 1) напряжение нагрузки и (развертка 3) ток в первичной обмотке (после установления напряжения) показаны в различных масштабах времени. Номинальное линейное напряжение

Дополнительные испытания в импульсном режиме проведены с емкостной нагрузкой, имитирующей большие поля при электростатическом осаждении. Для этой цели к нагрузке 180 кОм был подключен конденсатор емкостью 0,4 мкФ. Эксперименты проводились при частоте повторения приблизительно 0,2 Гц. Время нарастания от нуля до 100 кВ составило 20 мс.

Также было выполнено испытание устройства на устойчивость к искровому/дуговому разряду. Устройство подвергалось повторным замыканиям на землю при полном напряжении. Никаких повреждений не было обнаружено, такой

же результат получен после прерывистого искрения в ходе испытаний. Отметим, что дуговая/искровая защита обеспечивается патентованной L-R цепью, ограничивающей производную тока и амплитуду без существенного рассеяния мощности в этой цепи (меньше 10 Вт) в нормальном рабочем режиме.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан высоковольтный источник питания для применений с импульсами большой длительности. Выполнены все-сторонние испытания в широком диапазоне резистивных и емкостных нагрузок. Характерные особенности работы высоковольтного источника питания следующие:

- 1) многофазная топология и модульная конструкция позволяют легко и быстро подстраивать высоковольтный источник питания для определенных потребностей;
- 2) исключительно низкий уровень пульсаций и быстрое время нарастания в сочетании с низкой запасаемой энергией;
- 3) высокие КПД и PF в широком диапазоне выходных параметров;
- 4) конструкция с воздушным охлаждением;
- 5) небольшие размеры, масса, и занимаемая площадь; небольшой объем масла.

Можно предвидеть, что описанный подход будет широко внедряться в высоковольтных источниках питания для применений с импульсами большой длительности, особенно для сканеров компьютерной томографии. Благодарности

Авторы благодарят своих коллег в Spellman за широкую поддержку этой статьи, особенно мистера А. Липовича (A. Lipovich) за его вклад в конструкцию механической части и мистера А. Силверберга (A. Silverberg) за программирование алгоритма сдвига фаз для вентильной матрицы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] G. A. Mesyats, Pulsed Power and Electronics. Moscow, Russia: Nauka, 2004, Translation to English: "Pulsed Power," Kluwer, NY, 2005.
- [2] M. Kanter, S. Singer, R. Cerny, and Z. Kaplan, "Multikilojoule inductive modulator with solid-state opening switches," IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, no. 2, pp. 420–424, Apr. 1992.
- [3] A. Pokryvailo, I. Ziv, and M. Shapira, "Repetitive inductive storage power supply for ETC tank gun," IEEE Trans. Magn., vol. 39, no. 1, pp. 257–261, Jan. 2003.
- [4] K. Parker, Electrical Operation of Electrostatic Precipitators. London, U.K.: IEE, 2003.
- [5] Advanced Electrostatic Precipitator (ESP) Power Supplies Update: The State-of-the-Art of High-Frequency Power Supplies. EPRI, Palo Alto, CA, 2006, 1010361.
- [6] M. K. Kazimierczuk and D. Czarkowski, Resonant Power Converters. New York: Wiley, 1995.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи**

- [7] R. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [8] W. A. Reass, D. M. Baca, R. F. Gribble, D. E. Anderson, J. S. Przybyla, R. Richardson, J. C. Clare, M. J. Bland, and P. W. Wheeler, "Highfrequency multimegawatt polyphase resonant power conditioning," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 33, no. 4, pp. 1210–1219, Aug. 2005.
- [9] M. J. Bland, J. C. Clare, P. W. Wheeler, and R. Richardson, "A 25 kV, 250 kW multiphase resonant power converter for long pulse applications," in *Proc. IEEE Pulsed Power Plasma Sci. Conf.*, 2007, pp. 1627–1630.
- [10] M. J. Bland, J. C. Clare, P. Zanchetta, P. W. Wheeler, and J. S. Przybyla, "A high frequency resonant power converter for high power RF applications," in *Proc. Eur. Power Electron. Conf.*, 2005, pp. 1–10.
- [11] H. Baumann, "X-ray diagnostic generator," U.S. Patent 4 375 105, Feb. 22, 1983.
- [12] Y. Petrov and A. Pokryvailo, "HV DC-to-DC converter," *Prib. Tekh. Eksp.*, vol. 2, pp. 141–143, 1986.
- [13] V. Y. Ushakov, *Insulation of High-Voltage Equipment (Power Systems)*. New York: Springer-Verlag, 2004 (Translation from Russian ed. 1994).
- [14] B. Kurchik, A. Pokryvailo, and A. Schwarz, "HV converter for capacitor charging," *Prib. Tekh. Eksp.*, no. 4, pp. 121–124, 1990.
- [15] A. Pokryvailo, C. Carp, and C. Scapellati, "High power, high efficiency, low cost capacitor charger concept and demonstration," in *Proc. 17th IEEE Int. Pulsed Power Conf.*, Washington, DC, Jun. 29–Jul. 2, 2009, pp. 801–806.
- [16] A. Pokryvailo, "On electromagnetic processes in HV transformers of switching-mode power supplies at no-load conditions," in *Proc. 27th Int. Power Modulators Symp.*, Arlington, VA, May 14–18, 2006, pp. 287–290.
- [17] [Online]. Available: [http://www.pemuk.com/pdf/cwt\\_mini\\_0605.pdf](http://www.pemuk.com/pdf/cwt_mini_0605.pdf)
- [18] [Online]. Available: <http://www.spellmanhv.com>
- [19] *IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing*, IEEE Std-4-1995, section 5.1.5.
- [20] A. Pokryvailo and C. Carp, "Accurate measurement of ON-state losses of power semiconductors," in *Proc. 28th Int. Power Modulators Symp.*, Las Vegas, NV, May 27–31, 2008, pp. 374–377.



**Алекс Покрывайло (M'05-SM'07)** родился в России, в городе Выборг. Он получил степени к.т.н. и д.т.н. в области электротехники в Ленинградском политехническом институте в Санкт-Петербурге (Россия) в 1975 и 1987 гг. соответственно.

Работал в Ядерном исследовательском центре «Нахаль Сорек» в Израиле. В настоящее время работает в компании Spellman High Voltage Electronics Corporation, Hauppauge, NY. Опубликовал свыше 100 статей, два учебника (на иврите), и более 20 патентов, относящихся к высоковольтной технике. Его текущие и недавние работы относятся к импульсной мощности; особое внимание уделяется сильноточным открывающим и закрывающим коммутирующим устройствам и проектированию магнитных цепей, быстрой диагностике, разработке мощных высоковольтных импульсных источников питания, и коронным разрядам. Ранее он изучал бездуговое переключение, разрабатывал элегазовую коммутационную аппаратуру, проводил исследование в области взаимодействия пламени с электромагнитными полями и т.д.

**Костел Карп**, фотография и биография ко времени публикации отсутствовали.

**Клиффорд Скапеллати**, фотография и биография ко времени публикации отсутствовали.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи**

Масло значительно ухудшается в оборудовании, находившемся в работе в течение продолжительного периода. В оборудовании с герметичными баками, например в рентгеновских моноблоках [8], масло может и не изменяться в течение срока службы оборудования. В таких обстоятельствах механизмы пробоя и электрическая прочность очищенного свежего масла несут существенны, за возможным исключением для начального выбора масла. Рабочая напряженность поля выбирается на основании ожидаемого напряжения пробоя в конце срока службы. Существует обширная база данных для электрической прочности свежих и старых масел при постоянном, переменном токе и импульсном напряжении, см. например [1]–[7] и их ссылки.

Как у всех диэлектриков, под воздействием коротких импульсов пробивное напряжение жидкостей имеет тенденцию к возрастанию, хотя и не единообразному [5], [9]. В раннем исследовании [9] сообщено, что для трансформаторного масла под воздействием импульсов длительностью до нескольких миллисекунд и очень низких значений частоты повторения импульсов (PRR) пробивные напряжения были выше, чем при переменном токе (60 Гц), с коэффициентом приблизительно от 1,5 до 2, с большим возрастанием для более коротких импульсов.

В некоторых видах оборудования масло подвергается воздействию повторяющегося импульсного напряжения. Несмотря на огромное количество данных о пробивном напряжении, мы не смогли найти явное сравнение электрической прочности масла при напряжениях переменного или постоянного тока с таковой при воздействии повторяющихся импульсов длительностью в несколько миллисекунд. Так как толщина изоляции в оборудовании, используемом для различных специальных применений (например, для рентгеновских установок) намного меньше обычно применяемой в энергетическом оборудовании (например в трансформаторах и коммутационной аппаратуре), сведения об электрической прочности при воздействии повторяющихся импульсов длительностью в несколько миллисекунд являются важными. Два этих фактора мотивировали рассматриваемое ниже исследование.

**УСТАНОВКА И МЕТОДЫ****А. Высоковольтный источник питания**

Основные параметры заказного импульсного высоковольтного источника питания сведены в Таблицу 1. Он вырабатывает импульсы биполярного напряжения, симметричного относительно земли (от нуля до  $\pm 80$  кВ) с PRR до 150 Гц. Предусмотрено обнаружение дугового разряда и последующее выключение. Хотя питание высоковольтного источника питания можно осуществлять непосредственно от магистрали, мы предпочли питать его преобразователь постоянного тока от регулируемого источника питания постоянного тока (из серии SL компании Spellman [10]). Этим обеспечивалась большая гибкость управления высоковольтной частью. Выходное напряжение подавалось по двум экранированным кабелям, приблизительно 3 м длиной каждый, или по двум неэкранированным кабелям, приблизительно 2 м длиной каждый. Важность точного задания выхода заключается в том, что емкость высоковольтного кабеля сильно влияет на время спада импульса, ограничивая PRR.

**Сравнение электрической прочности трансформаторного масла при напряжении постоянного тока и повторяющихся импульсах с длительностью до нескольких миллисекунд**

А. Покрываило (A. Pokryvailo) и С. Карп (C. Carp)  
Spellman High Voltage Electronics Corporation  
475 Wireless Boulevard Hauppauge, NY 11788

*Проведено сравнение электрической прочности свежего и загрязненного трансформаторного масла при повторяющихся импульсах длительностью несколько миллисекунд с таковой при напряжении постоянного тока. Обнаружено, что импульсное пробивное напряжение выше своего аналога при постоянном токе на 10–20 %.*

**Ключевые слова:** трансформаторное масло, импульсы с длительностью до нескольких миллисекунд, высоковольтный источник питания

**ВВЕДЕНИЕ**

Электрическая прочность электроизоляционных жидкостей в общем и трансформаторного масла в частности представляет большой практический интерес и широко изучается в течение более чем ста лет [1]–[6]. Работа [7] посвящена импульсному пробоя жидкостей в широком диапазоне параметров и имеет особенно близкое отношение к работе, представленной в настоящей статье.

Хорошо известно, что электрическая прочность свежего, полностью очищенного масла в несколько раз выше, чем таковая старого загрязненного масла, за исключением для импульсов с длительностью порядка нано- или пикосекунд. Некоторые из причин этого различия следующие: (1) под влиянием электрического поля твердые частицы примеси или вода могут образовывать цепь и инициировать пробой [1]; (2) твердые примеси могут появляться в масле в результате случайных или предусмотренных дуговых разрядов или окисления металлов; (3) вода может абсорбироваться из атмосферы в негерметических устройствах.

Различные механизмы пробоя широко обсуждаются [1]–[7]. В высокоочищенных жидкостях пробой обычно вызывается микродефектами, например полости газа размером порядка нано- и микрометров, улавливаемые поверхностями электродов в массе жидкости. Даже при отсутствии микропузырьков переход жидкости в газообразное состояние может возникнуть в результате нагревания электронами, излучаемыми катодом под действием поля. Так как электрическая прочность газа намного ниже, чем у соответствующей жидкости, разряд инициируется в газе и может развиваться вплоть до полного пробоя через массу жидкости. Более подробные сведения смотрите в гл. 2 работы [7]. В загрязненных окислившимся жидкостях механизмы пробоя не столь изоцированные, например механизм, при котором инородные частицы выстраиваются вдоль силовых линий электрического поля, образуя мост, вызывающий разряд. Однако этот механизм обычно действует в масштабе миллисекунд вследствие медленно ассоциированного движения частиц [4]–[7].

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

Таблица 1. Основные технические характеристики высоковольтного источника питания

Входное напряжение	От 90 до 264 В пер., 50/60 Гц (или от 0 до 420 В пост. при обходе входного выпрямителя и корректора коэффициента мощности)
Выходное напряжение	От 0 до 160 кВ (от 0 до ±80 кВ биполярное симметричное относительно земли)
Выходной ток	От 0 до 12 мА
Частота повторения импульсов	Постоянный ток или одиночные до 150 Гц (ограничение по времени спада)
Время нарастания до номинального напряжения	<1 мс без экранированных высоковольтных кабелей
Выходная емкость	Приблизительно 30 пФ (не учитывая экранированные высоковольтные кабели)
Время спада	Зависит от нагрузки и высоковольтного кабеля
Пульсация, размах:	<2 %
Частота преобразования	150 кГц
Размер	15,7 × 34,3 × 45,7 см
Изоляция	Трансформаторное масло

Высоковольтный источник питания с присоединенными неэкранированными кабелями с полиэтиленовой изоляцией показан на рисунке 1 вместе с двумя генераторами функций, задающими PRR и частоту пилообразного напряжения (см. ниже Методику испытаний). Это стандартный комплект Spellman, состоящий из низковольтной и высоковольтной частей. В состав низковольтной части входят линейный выпрямитель, корректор коэффициента мощности, инвертор и плата управления. Высоковольтная часть состоит из высоковольтных трансформаторов, умножителей, делителей обратной связи и т. д., в ней используется масляная изоляция.

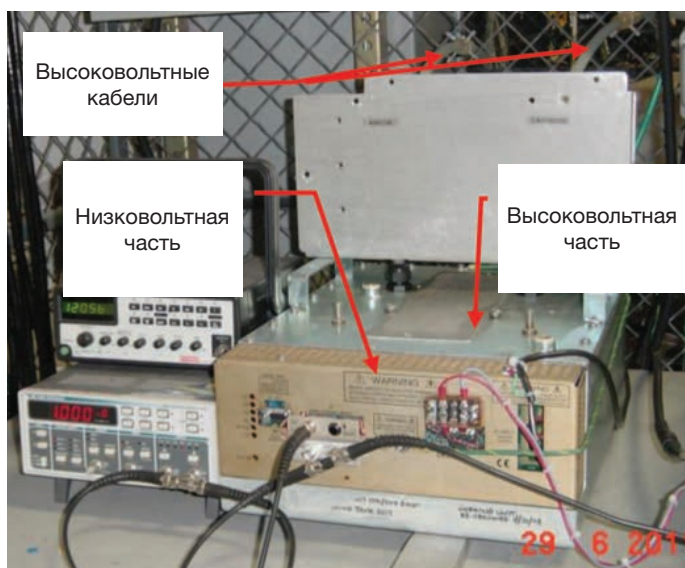


Рисунок 1. Высоковольтный источник питания с неэкранированными кабелями с полиэтиленовой изоляцией

Типовой выход отрицательной полярности относительно земли при полном напряжении (75 кВ, или 150 кВ между полюсами), измеренный с делителем обратной связи, показан на рисунке 2. Пологость нижней части импульса по результатам

наблюдений во время калибровочных испытаний с высоковольтным щупом Tektronix P6015A (Tektronix Inc., Beaverton, OR) до 40 кВ, лучше показанной на рисунке 2. Ограничивающим повышением PRR фактором является время разрядки кабелей. (Емкостью умножителя приблизительно 30 пФ можно пренебречь.)

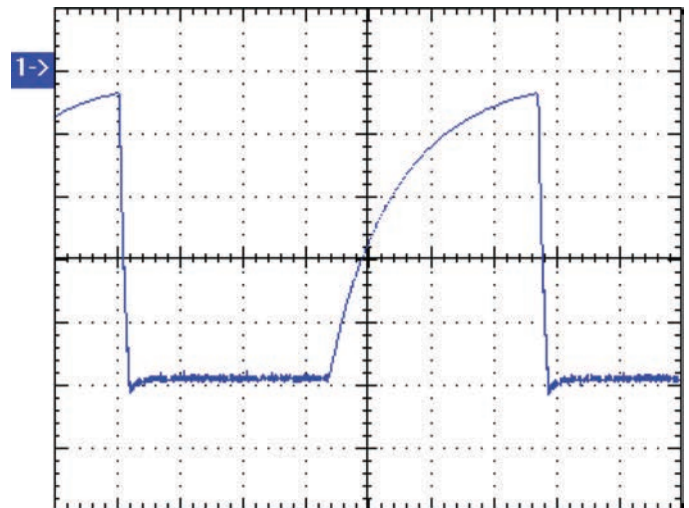


Рисунок 2. Типовой выход отрицательной полярности (-75 кВ), с экранированными кабелями. Сопротивление нагрузки = 83,5 мОм. Частота повторения импульсов = 15 Гц. Вертикальный масштаб 15 кВ/дел., с нулем, указанным 1->; горизонтальный масштаб 10 мс/дел.

В. Испытываемое устройство

Для имитации рабочих условий рентгеновских трубок и других высоковольтных частей в масле для искрового промежутка выбрана конфигурация плоскость — сфера. Коэффициент неоднородности поля  $f$ ; определяется в виде

$$f = E_m / E_{av}, \tag{1}$$

где  $E_m$  и  $E_{av}$  — соответственно максимальная и средняя напряженность поля в промежутке; в модулируемых системах обычно должна быть в диапазоне от 1,5 до 6. Низкие значения относятся к большим электродам с низкой кривизной, а большие значения относятся к паяным соединениям шариковых контактов таких компонентов как диоды, резисторы и конденсаторы.

Испытательный искровой промежуток показан на рисунке 3. Диаметр полированной латунной сферы равен 12,5 мм, плоскость образована закругленным по краям алюминиевым диском толщиной 20 мм и диаметром 63,4 мм. Изготовленные из поликарбоната прочные стойки с элементами жесткости удерживают электроды; промежуток можно изменять от 0 до 40 мм с помощью резьбового стержня. Однако практические испытательные промежутки были ограничены до 15 мм возможностями высоковольтного источника питания. Анализ поля (см. приложение) показал, что в практических испытательных промежутках коэффициент неоднородности поля  $f$  варьирует от единицы до чуть более 3. Отметим здесь, что электрическое поле в промежутке

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

**Научные статьи**

плоскость — сфера для симметричного соединения (приложение двухполюсного напряжения) очень похоже на таковое для заземленной плоскости.

С неэкранированными кабелями испытания в импульсном режиме проводились с использованием нагрузки 20 МОм, что позволяло выполнять испытания с PRR вплоть до 120 Гц.



**Рисунок 3. Искровой промежуток плоскость — сфера**



(a)

Для испытаний было выбрано широко используемое в промышленности масло Shell Diala A/AX (Shell Oil Company, Houston, TX). Электрическая прочность при 60 Гц определялась согласно ASTM D 1816-84a [11] для свежего масла (перед испытаниями) и для загрязненного масла (после испытаний). Результаты представлены в Таблице 2. Две партии масла объемом приблизительно 20 л каждая использованы для трех испытаний, перечисленных в таблице. Одна партия была использована в 2010 г. и другая в 2011 г.



(b)

**Таблица 2. Измеренные пробивные напряжения для свежего и загрязненного масла**

Год	Среднее пробивное напряжение (кВ)	Среднее квадратическое отклонение (кВ)	Состояние масла
2010	34,0	6,1	Чистое
2010	14,8	2,3	Загрязненное
2011	40,3	4,0	Чистое

**С. Компоновка высоковольтной части**

Искровой промежуток погружали в объем приблизительно 20 л масла в пластмассовом баке (рисунок 4). Разгрузочный резистор соединялся с высоковольтным источником питания для поддержания разряда, а соединенные с манжетами высоковольтного источника питания высоковольтные проводники в кремнийорганическом каучуке без покрытия — с искровым промежутком. Сначала ограничивающие резисторы не использовались, но после испытаний со свежим маслом (см. раздел «Свежее масло») для ограничения тока разряда на каждом полюсе был установлен узел из пяти последовательно соединенных резисторов по 22 кОм. Эти узлы использовались только с высоковольтными экранированными кабелями. В случае неэкранированных высоковольтных кабелей, принимая во внимание небольшую сумму запасенной энергии, ограничивающие резисторы не требовались. С экранированными кабелями нагрузка составляла 83,5 МОм.

**Рисунок 4. Компоновка высоковольтной части.**

- (а) Экранированные кабели (видны частично). Нагрузка поддерживается двумя высоковольтными делителями HVD100 [12], позволяющими измерять напряжения между полюсами и землей.
- (б) Неэкранированные кабели с полиэтиленовой изоляцией. Резистивная нагрузка сокращает время спада напряжения импульса

Переключение полярности осуществлялось перестановкой проводников. Таким образом, все испытания проводились с приложением биполярного напряжения (симметричное соединение).

**D. Методика испытаний**

Все испытания выполнялись при комнатной температуре. Напряжение увеличивалось линейно со скоростью 4 кВ/с до возникновения пробоя, или вплоть до максимального



ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Свежее масло (экранированные кабели)

Первые серии испытаний проводились со свежим маслом без ограничивающих резисторов на выходе кабелей. При PRR равной 10 Гц пробой происходили, главным образом, на плоской вершине или во время спада импульса. Результаты приведены на рисунке 5. Как ожидалось, пробивное напряжение при отрицательной полярности было выше, чем при положительной полярности. Это имело место в случаях с газом, жидкостью и твердой изоляцией, и для многих форм электродов, размеров промежутков и форм колебаний напряжения. Сжатое изложение влияния полярности можно найти в [5]. Заметное различие между пробоем в импульсном режиме и при постоянном токе отсутствует. Среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения было значительно больше при положительной полярности, чем при отрицательной полярности.

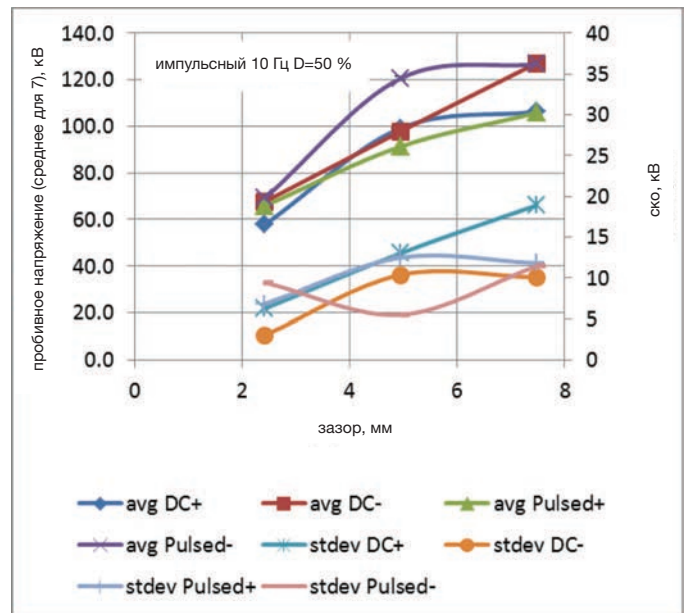


Рисунок 5. Пробивные напряжения для свежего масла, без ограничивающих резисторов на выходе кабелей.

Частота повторения импульсов (PRR) = 10 Гц,  
D = коэффициент заполнения = 50 %.

Загрязненное масло (экранированные кабели)

(1) Загрязненность, относящаяся к дуговому разряду

После испытаний со свежим маслом, на электродах были установлены описанные в разделе IIC ограничивающие резисторы, как показано на рисунке 6 (пять резисторов по 22 кОм на каждом полюсе). При наименьшем промежутке аварийное отключение вследствие дугового разряда не срабатывало после первого пробоя, поэтому перед отключением устройство образовывало дугу несколько раз, иногда в течение 1–2 с. Так как во время разряда весь накапливаемый в емкости кабеля заряд проходил через дуговой канал, масло потемнело

150 кВ, или путем программирования мощности источника питания Spellman SL (для измерений с экранированными кабелями) или программирования высоковольтного источника питания (для измерений с неэкранированными кабелями). В первом случае высоковольтный источник питания работал с открытой петлей обратной связи, а во втором случае — с закрытой петлей обратной связи, которая приводила к более жесткому регулированию амплитуды выходного напряжения и более ровной вершине импульса. Если перед достижением максимального напряжения пробой не происходил, напряжение затем линейно уменьшалось со скоростью 4 кВ/с. Испытания для каждого интервала промежутка выполнялись для следующих форм колебаний напряжения:

- 1) положительная полярность, обозначенная как DC+ (сфера положительная);
- 2) отрицательная полярность, обозначенная как DC- (сфера отрицательная);
- 3) импульсы положительной полярности, обозначенные как Pulsed+ (сфера положительная);
- 4) импульсы положительной полярности, обозначенные как Pulsed- (сфера отрицательная).

Для форм колебаний 3 и 4 импульсный выход модулировался пилообразным напряжением. При PRR равном 10 Гц коэффициент заполнения D был 50 %, и 20 % при PRR равном 30, 50, и 120 Гц.

Между следующими друг за другом испытаниями выдерживался интервал по меньшей мере 1 мин согласно процедурам испытаний масла [11], [13]. Для каждого из четырех типов испытаний выполнялись семь испытаний на пробой и вычислялись средние значения и среднее квадратическое отклонение. Если приложение напряжения не приводило к пробоем, для соответствующего испытания назначалось пробивное напряжение 150 кВ. После каждого изменения размера промежутка выполнялась очистка электродов.

Пробивное напряжение в испытаниях с постоянным током определяли с помощью ампервольтметра Fluke 179 (изготовитель Fluke Corporation, Everett, WA), с использованием его функции MaxMin (сбор данных максимального значения). При испытаниях в импульсном режиме значения пробивного напряжения регистрировали с помощью осциллографа TDS3034C (Tektronix Inc.). Его горизонтальную развертку была установлена таким образом, чтобы захватывать несколько последних импульсов перед пробоем. Значение пробивного напряжения задавалось по пику сигнала делителя обратной связи, если пробой происходил при нарастающем фронте или на вершине, и по «амплитуде» плоского участка (пренебрегая перерегулированием, если имеется), если пробой происходил на вершине вверху или на заднем фронте. Также регистрировалось пиковое значение огибающей такого же сигнала в масштабе времени 10 с/дел. В режиме с разомкнутой петлей обратной связи вершина импульса значительно спадала вследствие ограниченной мощности источника питания постоянного тока; при работе с замкнутой петлей обратной связи вершина импульса была главным образом плоской.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

от сажи, несмотря на низкий пиковый ток (рисунок 6) и, по результатам испытаний стандартным методом, его пробивное напряжение заметно уменьшилось (Таблица 2).

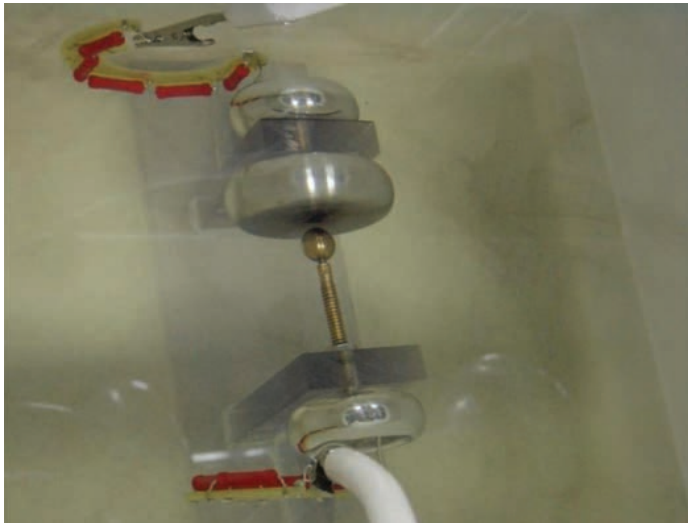


Рисунок 6. Присоединенные к электродам ограничивающие резисторы (красного цвета). Заметна плавающая в масле сажа

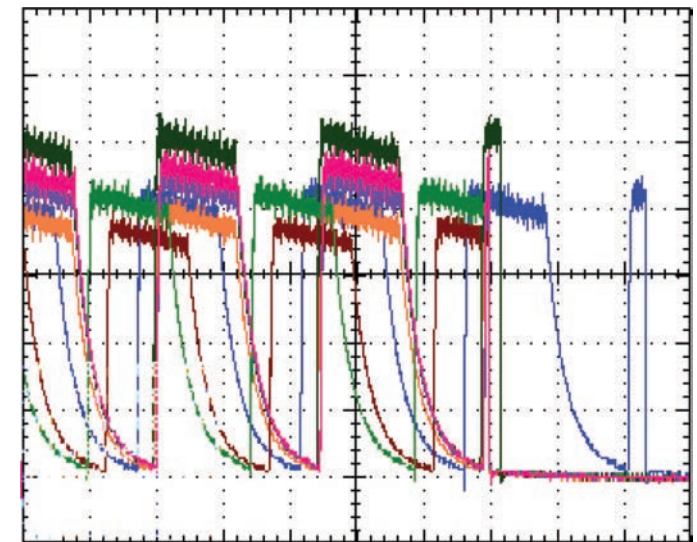


Рисунок 8. Последние импульсы перед пробоем для 7,47-мм промежутка, отрицательная полярность, масло, загрязненное в результате дугового разряда. PRR = 10 Гц, D = 50 %. Горизонтальный масштаб 40 мс/дел., вертикальный масштаб 30 кВ/дел.

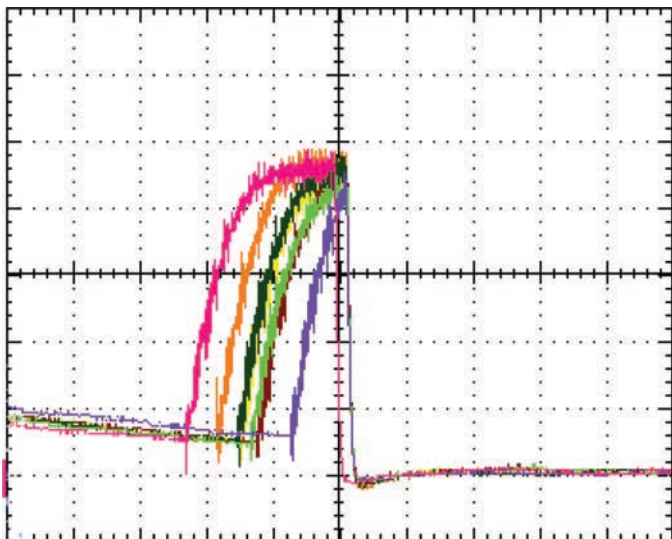


Рисунок 7. Последний импульс при пробое для 10-мм промежутка, отрицательная полярность, масло, загрязненное в результате дугового разряда. PRR = 30 Гц, D = 20 %. Горизонтальный масштаб 2 мс/дел., вертикальный масштаб 30 кВ/дел.

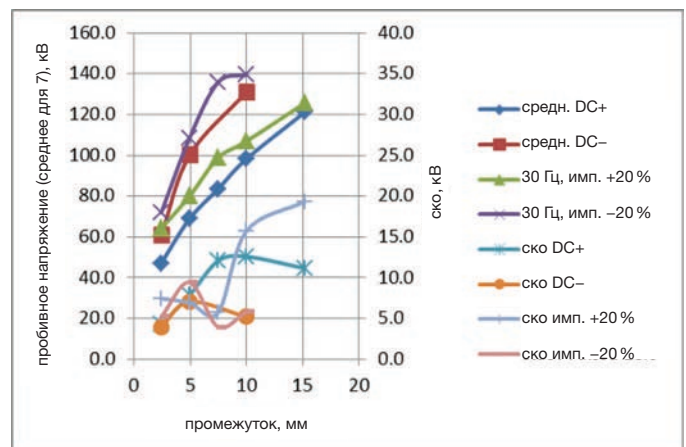


Рисунок 9. Пробивное напряжение для масла, загрязненного в результате дугового разряда. PRR = 30 Гц, D = 20 %

Выполнены две серии испытаний с маслом, загрязненным сажой. В первом параметры напряжения были такими же, как и раньше, т. е. PRR = 10 Гц и D = 50 %. Для исследования влияния длительности импульса во второй серии выбраны PRR = 30 Гц и D = 20 %. Типичный для второй серии набор форм колебаний при пробое показан на рисунке 7. Осциллограф срабатывал по заднему фронту (спаду) последнего импульса (импульс, на котором происходил пробой); все пробои

происходили или при нарастающем (переднем) крае, или непосредственно после пика, а для более продолжительных импульсов первой серии они происходили главным образом на «плоской» вершине (рисунок 8).

Результаты представлены в графическом виде на рисунках 9 и 10. Пробивное напряжение так же было выше при отрицательной полярности, чем при положительной полярности (в 15,2-мм промежутке дуговой разряд не возникал в большинстве испытаний вплоть до 160 кВ), и среднеквадратическое отклонение было меньше. Однако наблюдалось заметное различие между пробоем в импульсном режиме и при постоянном токе при обеих полярностях; среднее значение пробивного напряжения в импульсном режиме было выше, чем его аналог при постоянном токе на 14,9 % при

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**
**Научные статьи**
**Таблица 3. Пробивные напряжения для масла, загрязненного сажей и другими добавками, измеренные с использованием 15,2-мм искрового промежутка**

Вид испытаний	Среднее пробивное напряжение (кВ) для масла, загрязненного сажей и другими добавками	Среднее пробивное напряжение (кВ) для масла, загрязненного только сажей
DC+	116 (сажа + кварц)	121
DC+	127 (сажа + кварц + технический углерод)	121
Импульсный+, 30 Гц, D = 20 %	132 (сажа + кварц)	125,7
Импульсный+, 30 Гц, D = 20 %	130 (сажа + кварц + технический углерод)	125,7

- (1) Содержащее проводящие или полупроводящие нанозаполнители масло имеет большую пробивную прочность, чем масло без нанозаполнителей [14]–[16].
- (2) Неоднородность поля уменьшается с увеличением проводимости.

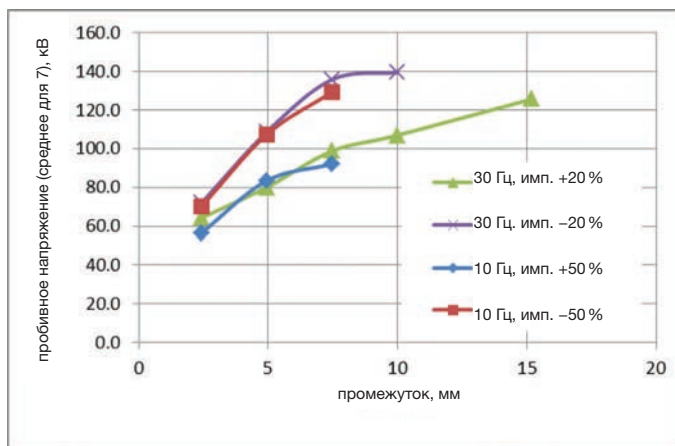
**Загрязненное масло (неэкранированные кабели, 2011 г.)**

Измерения выполнены на новой партии масла, которое было загрязнено сажей, образовавшейся в течение продолжительного дугового разряда во время предварительных испытаний. Ставилось целью исследовать, окажет ли сильное влияние на электрическую прочность при PRR выше 30 Гц по сравнению с наблюдаемым при значениях до 30 Гц. Соответственно временные интервалы между следующими друг за другом испытаниями выдерживались насколько возможно более короткими, т. е. испытание с положительной полярностью при постоянном токе следовало непосредственно за испытанием импульсами постоянного тока и наоборот. Ширина промежутка и расположение проводников не изменялись, поэтому масло не перемешивалось и его состояние между испытаниями оставалось в значительной степени неизменным. Поэтому возможно значимое сравнение между испытаниями при постоянном токе и в импульсном режиме; сравнение результатов, получаемых в разные дни, было бы сомнительно.

Неэкранированные высоковольтные кабели, большие нагрузки и работа в режиме замкнутой петли обратной связи позволили выполнить испытания при более высоких PRR с более чистыми формами колебаний. На рисунке 11(а) показан, для PRR = 50 Гц, типичный последний импульс перед пробоем и следующий импульс, на ровной вершине которого произошел пробой. (На развертках 1 и 3 на рисунке 11(б) показаны импульсы, во время которых происходил пробой при PRR = 120 Гц. Времена нарастания этих импульсов меньше 1 мс, тогда как развертка 2 показывает, что задний фронт импульса, во время которого пробой не происходит, по продолжительности составил приблизительно 7 мс. Пробои наблюдались только по переднему фронту или на плоской вершине, никогда по заднему фронту.

Результаты испытаний приведены на рисунке 12. Рисунок 12(с) построен на основании пробивных напряжений, показанных на рисунках 12(а) и 12(б), в целях наглядности

положительной и на 10,3 % при отрицательной полярности. Мы объясняем эту разницу механизмом пробоя моста в загрязненных жидкостях [1]–[2], [4]–[7]. Необходимо некоторое время для образования загрязняющими частицами моста вдоль направления поля и возникновения пробоя. Однако четкое различие между случаями продолжительных и коротких импульсов отсутствует (рисунок 10).



**Рисунок 10. Пробивное напряжение для масла, загрязненного в результате дугового разряда. PRR = 30 Гц с D = 20 %, и PRR = 10 Гц с D = 50 %**

**(2) Загрязненность сажей и другими добавками**

Для сильно загрязненного (окисленного) масла можно ожидать даже большего уменьшения электрической прочности по сравнению со свежим маслом и маслом, загрязненным сажей. Так как загрязнение масла вследствие промышленного использования требует времени, мы решили добавить другие загрязнители в четко определенных пропорциях. Были приготовлены два набора образцов:

- 4 мл (приблизительно 0,24 г) измельченного кремнезема (Degussa R812, гидрофобный, размер частиц 8 нм, также известен как Aerosil R 812, Evonik Degussa GmbH, Essen, Germany) тщательно перемешаны с 20 л загрязненного сажей масла, использованного в измерениях, описанных выше.
- В добавление к мелким кварцевым частицам затем добавлены 4 мл пасты на основе силикона, содержащей наноразмерный технический углерод (изготовитель Dispersion Technology Inc., Bedford Hills, NY; цвет K-73169, средний размер частиц 42 нм) и размешаны до равномерного растворения, окрасившего масло и сделавшего его почти непрозрачным.

Измерения пробивного напряжения выполнены только на 15,2-мм искровом промежутке при положительной полярности, так как резкого изменения электрической прочности, сравнимого с измеренным на образцах, загрязненных только сажей, не наблюдалось.

Хотя кварц до некоторой степени уменьшил пробивное напряжение, технический углерод его увеличил (Таблица 3). Возможные объяснения этого увеличения приведены ниже.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

среднеквадратические отклонения опущены. На рисунке 12(с), (50) или (120) показано, что пробивные напряжения при постоянном токе измерялись в следующих друг за другом испытаниях с их импульсными аналогами при 50 или 120 Гц соответственно. Таким образом средн. DC+(120) означает, что положительные пробивные напряжения постоянного тока были измерены непосредственно перед или после испытаний в импульсном режиме при положительной полярности и при 120 Гц (средн. DC+120Гц) для каждой ширины промежутка. Поэтому между этими испытаниями масло не перемешивалось (что происходило бы при изменении промежутка или перекидывании проводников).

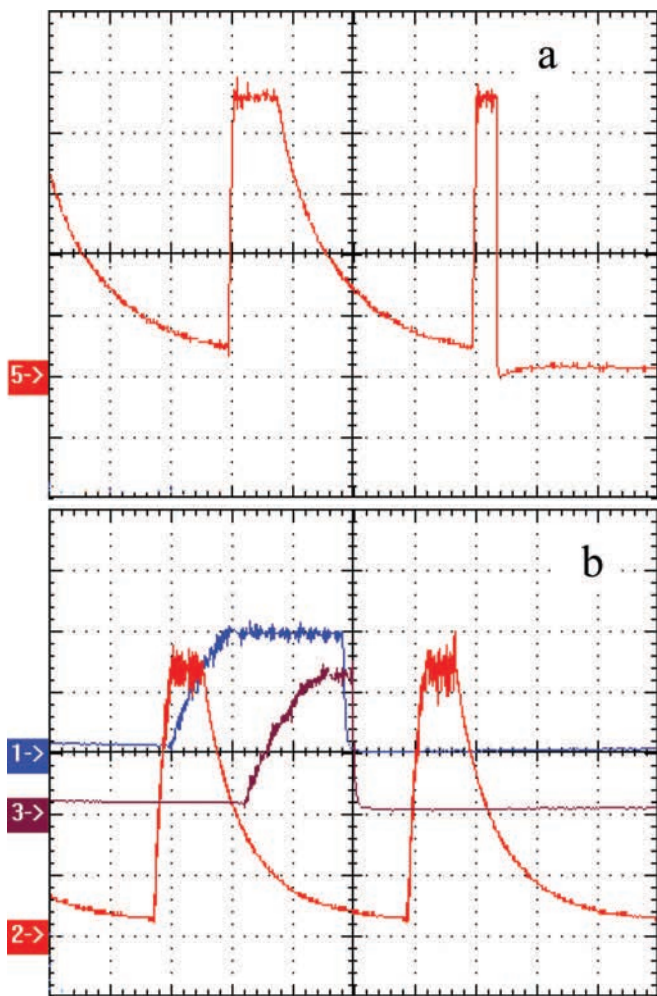
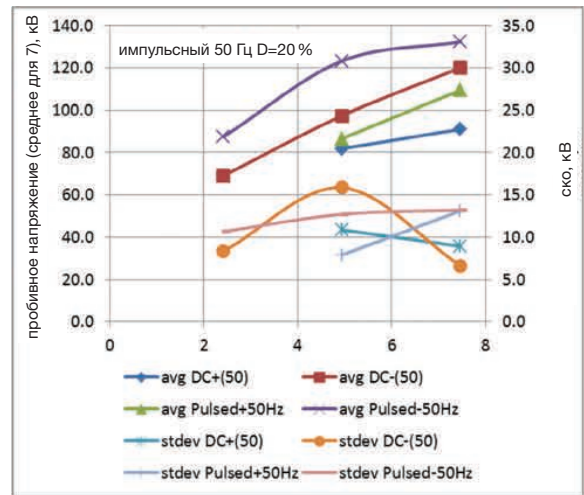
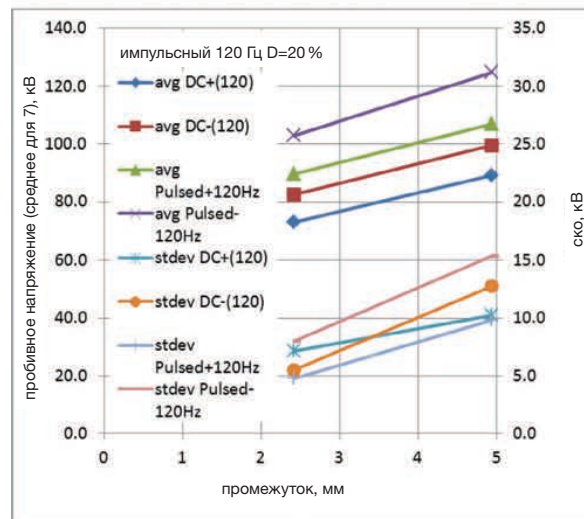


Рисунок 11. Типичные формы импульсных колебаний.

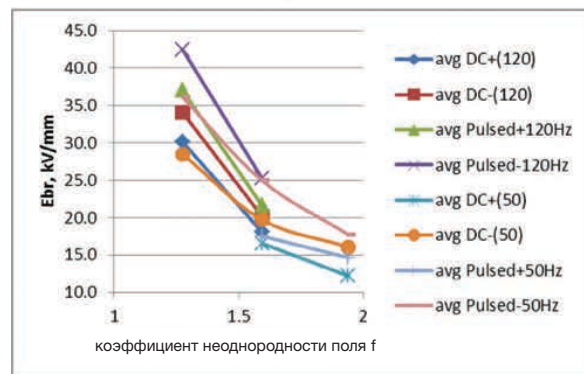
(a) Последний импульс перед пробоем, за которым следует импульс, во время которого произошел пробой. Промежуток = 7,47 мм, нагрузка = 82 МОм, отрицательная полярность, PRR = 50 Гц, горизонтальный масштаб = 5 мс/дел., вертикальный масштаб = 30 кВ/дел. 5→ указывает на нуль на вертикальной оси. (b) Развертки 1 и 3 показывают импульс, на котором произошел пробой; горизонтальный масштаб 0,5 мс/дел., вертикальный масштаб 60 кВ/дел. На развертке 2 показан продолжительный задний фронт импульса, когда пробой не происходит; горизонтальный масштаб 2 мс/дел., вертикальный масштаб 30 кВ/дел. 1→, 2→, и 3→ указывают на вертикальной оси нули для соответствующих разверток. Промежуток = 4,94 мм, нагрузка = 20 МОм, отрицательная полярность, PRR=120 Гц.



(a)



(b)



(c)

Рисунок 12. Результаты испытаний (2011 г.). (a) Испытания при постоянном токе и в импульсном режиме при PRR = 50 Гц, D = 20%. (b) Испытания при постоянном токе и в импульсном режиме при PRR = 120 Гц, D = 20%. (c) Зависимость пробивной напряженности поля Ebr от коэффициента неоднородности поля f. Зависимость построена с использованием данных а и b (отметим единообразие легенд серий данных для а, b и c)

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

## Научные статьи

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Заметно, то пробивные напряжения для импульсных форм колебаний при 50 и 120 Гц значительно превосходят свои аналоги при постоянном токе. На рисунке 12(с) показано, что пробивная напряженность поля  $E_{br}$  резко уменьшается с ростом коэффициента неоднородности поля  $f$ . Последний вычисляется для геометрии, показанной на рисунке 14 приложения.

Из таблицы 4, в которую сведены результаты всех испытаний, видно, что пробивное напряжение последовательно выше в условиях импульсного режима, чем при постоянном токе.

**Таблица 4. Возрастание пробивного напряжения (BV) в процентах для импульсных форм сигналов относительно их аналогов при постоянном напряжении**

[D = 50 % при частоте повторения импульсов PRR = 10 Гц, D = 20 % для других значений PRR]

PRR, Гц	Полярность	
	Положительная	Отрицательная
10	15,6	10,4
30	14,9	10,3
50	12,0	16,6
120	19,3	22,2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше результаты наводят на мысль о том, что при разработке масляной изоляции для условий импульсного режима на частотах вплоть до 100 Гц возможно уменьшение толщины изоляции от 10 до 20 % относительно значений, требуемых для постоянного тока. Однако следует проявлять осторожность по причине немногочисленности испытаний, выполненных в весьма ограниченном диапазоне параметров. При испытаниях в масле присутствовали только твердые нерастворимые примеси, и состояние масла было в значительной степени неуправляемым. Следует также признать, что намного большие объемы масла, подвергающиеся воздействию в реальных системах, приводили бы к низшим пробивным напряжениям, сравнимым с нашими результатами для испытательных промежутков (см. гл. 6 в [5]).

Так как в масле присутствовали только твердые примеси, следует рассматривать мостовой механизм пробоя. Для постоянного тока или импульсов с длительностью больше, скажем, 50 мс, частицы могут образовать мост, который способен инициировать пробой [1], [2], [4]–[7]. Это можно аргументировать тем, что результаты исследования в настоящей работе согласуются с этим аварийным механизмом. При более высоких частотах (от 30 до 120 Гц) пробой происходил главным образом на переднем фронте импульса или сразу же после него, тогда как при 10 Гц (и более продолжительных импульсах) он происходил главным образом на плоской вершине или заднем фронте импульса. Поэтому завершение пробоя занимает несколько десятков миллисекунд, что уверенно наводит на мысль о том, что действовали медленные процессы.

В этом разделе мы численно определяем неоднородность поля в испытательном промежутке, и влияние земли в этом случае симметричного соединения. Известно, что даже отдаленная земля может вызывать резкие изменения в распределении поля, когда они менее всего ожидаются (см. в [17] пример подвешенной высоко над землей двухпроводной линии передачи с расстоянием между проводами на несколько порядков меньше расстояния от земли).

Аналитическое решение для поля на оси промежутка сфера – сфера при симметричном соединении можно получить в виде последовательности, используя метод изображений [18]–[20]. Максимум поля  $E_m$  находится в точках А и В на соединяющей сферы оси (рисунок 13). Для симметричного соединения

$$E_m = \frac{V}{2r} \frac{(1+x)^2}{1-x} \cdot \sum_{n=0}^N x^n \cdot \frac{1-x^{2n+1}}{(1+x^{2n+1})^2}, \quad (2)$$

где  $x = (h/r) - \sqrt{(h/r)^2 - 1}$  и  $V$  есть разность потенциалов между сферами (потенциал одной  $V/2$  и другой  $-V/2$  относительно земли). Коэффициент неоднородности поля  $f = E_m/E_{av}$ , где средняя напряженность поля в промежутке  $E_{av} = V/S$ , и промежуток  $S = 2(h-r)$ .

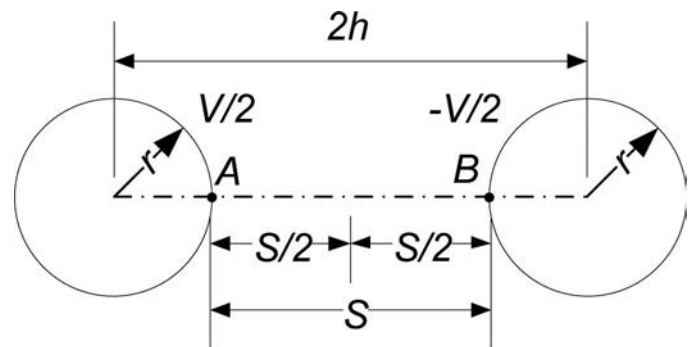


Рисунок 13. Геометрия промежутка сфера – сфера

Зная, что перпендикулярная оси и равноудаленная от сфер плоскость имеет нулевой потенциал, можно найти максимальную напряженность поля в промежутке плоскость – сфера из (2), разделив пополам приложенное напряжение и разделив на два ширины промежутка (см. рисунок 13). Коэффициент неоднородности поля для разделенного надвое промежутка  $S/2$  показан на рисунке 14 для диапазона ширины зазора.

Исследование влияния положения земли на распределение поля выполнено посредством анализа методом конечных элементов (Maxwell 2D Student Version [21]). Используя осесимметричную аппроксимацию (координаты R-Z), мы проанализировали симметричные и несимметричные соединения. Некоторые примеры моделирования показаны на рисунках 15–18. Здесь Z – ось вращения, и R – радиальная координата. Положительный электрод в виде установленной

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

на стержне сферы показан красным цветом, а отрицательный электрод в виде диска показан синим (см. рисунок 3). Отметим, что случай симметричного соединения с открытой границей (рисунок 18, нулевое напряжение в бесконечности) наиболее близок к идеальному случаю (рисунок 13). Обнаружено, что присутствие земли влияет на распределение поля только незначительно, также как и высоковольтные проводники, при условии, что промежуток намного меньше диаметра диска. Таким образом, в наших испытаниях  $f$  можно надежно оценить из рисунка 14. Несоответствие между аналитическими решениями, полученными с помощью (1) и (2), и результатами анализа методом конечных элементов для промежутка сфера – сфера обычно меньше 3% (график поля не показан).

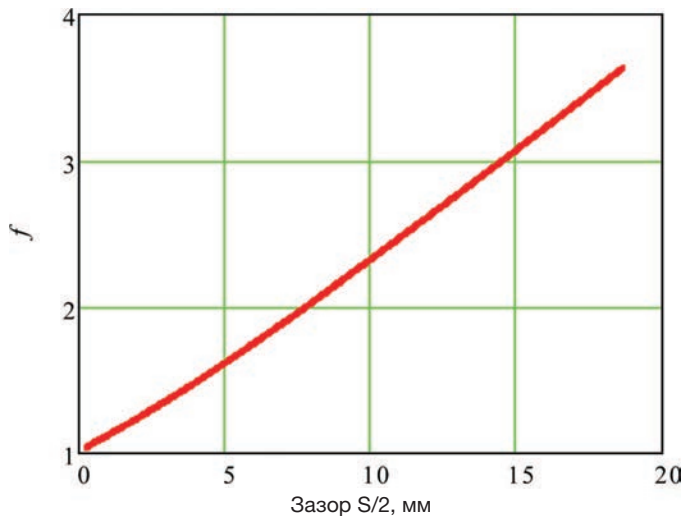


Рисунок 14. Коэффициент неоднородности поля  $f$  в функции промежутка  $S/2$  плоскость – сфера, с  $2r = 12,5$  мм (рисунок 13).  $N$  = число членов последовательности (2) = 1000

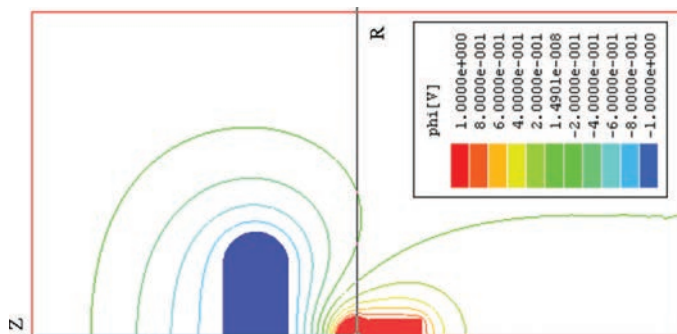


Рисунок 15. Распределение поля с симметричным соединением, заземленная граница показана красной линией.

Положительный электрод (установленная на стержне сфера), показанный красным цветом, имеет потенциал  $\phi = 1$  В. Отрицательный электрод (диск), показанный синим, имеет  $\phi = -1$  В. Зазор = 15 мм, коэффициент неоднородности поля  $f = 2,8$

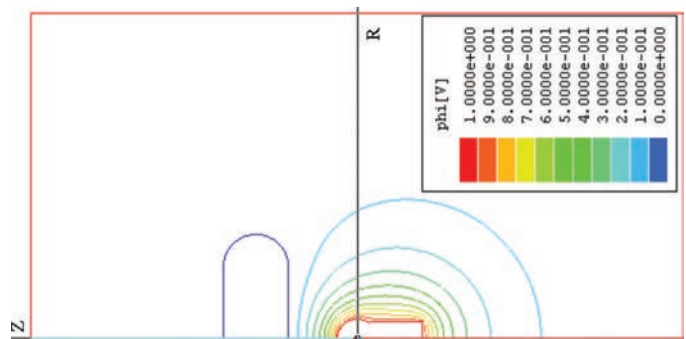


Рисунок 16. Распределение поля с отрицательным электродом (диск) и заземленной границей.  $f = 3,3$ , напряжение  $\phi = 1$  В приложено к положительному электроду (закрепленная на стержне сфера)

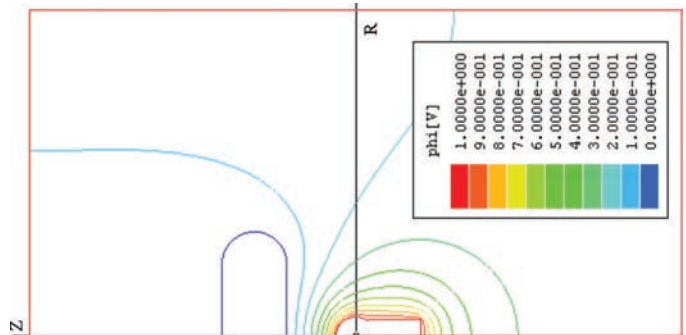


Рисунок 17. Распределение поля с заземленным отрицательным электродом (диск). Открытая граница,  $f = 3,15$ , напряжение  $\phi = 1$  В приложено к положительному электроду (закрепленная на стержне сфера)

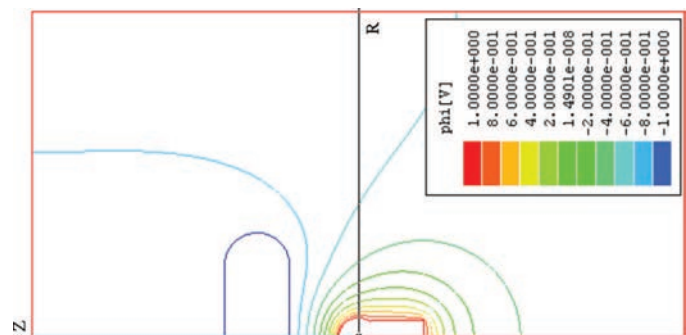


Рисунок 18. Распределение поля с симметричным соединением. Открытая граница,  $f=3,2$ , напряжение  $\phi = 1$  В приложено к положительному электроду (закрепленная на стержне сфера), напряжение  $\phi = -1$  В приложено к отрицательному электроду (диск)

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Spellman High Voltage Electronics Corp. за поддержку их работы.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**
**Научные статьи**

- [16] J. G. Hwang, "Elucidating the Mechanisms Behind Pre-breakdown Phenomena in Transformer Oil Systems," PhD Thesis, MIT, Cambridge, MA, 2010.
- [17] Pokryvailo, A., Yankelevich, Y., Nissim, N., Baksht, R., and Ashkenazy, J., "Development of Short Pulsed Corona on Two-Wire Transmission Line," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 34, no. 1, pp. 104–114, Feb. 2006.
- [18] G. I. Skanavi, Physics of Dielectrics: Strong-Field Region, Moscow, Russia: Fizmatlit, 1958.
- [19] K. A. Rezvykh, "Calculation of electrostatic fields," Energia, vol. 34, no. 1, pp. 73–75, 1967.
- [20] E. Kuffel and W. S. Zaengl, High Voltage Engineering, 2nd ed. Oxford, UK: Pergamon Press, 1984/2000.
- [21] Maxwell 2D Student Version, Ansoft Corp., Pittsburgh, PA, 2002.



**Алекс Покрывайло** родился в России, в городе Выборг. Он получил степени к.т.н. и д.т.н. в области электротехники в Ленинградском политехническом институте в 1975 и 1987 гг. соответственно. Прежде работал в Центре ядерных исследований Soreq в Израиле, сейчас является руководителем научно-исследовательских работ в Spellman High Voltage Electronics Corporation, Hauppauge, NY. Его текущие и недавние работы относятся к разработке мощных высоковольтных импульсных источников питания; особое внимание уделяется сильноточным открывающим и закрывающим коммутирующим устройствам и проектированию магнитных цепей, быстрой диагностике и коронным разрядам. Ранее он изучал бездуговое переключение, разрабатывал элегазовую коммутационную аппаратуру, выполнил исследование в области взаимодействия пламени с электромагнитными полями и т. д. Опубликовал свыше 100 статей, два учебника (на иврите), владелец более 20 патентов, относящихся к высоковольтной технике.



**Костел Карп** (Член IEEE начиная с 2006) родился в Румынии. Он получил степень бакалавра технологий в Политехническом институте г. Яссы (Румыния) в 1986, и с 2002 г. является сотрудником Spellman High Voltage Electronics Corporation. Основной областью его специализации является силовая электроника, особое внимание уделяется высоковольтным источникам питания высокой мощности для применения в промышленности и медицине.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- [1] I. Adamczewski, Ionization, Conductivity and Breakdown in Dielectric Liquids, London, UK: Taylor & Francis, 1969.
- [2] T. J. Gallagher, Simple Dielectric Liquids, Oxford, UK: Clarendon Press, 1975.
- [3] T. J. Lewis, "Basic Electrical Processes in Dielectric Liquids," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Ins., vol. 1, no. 4, pp. 630–643, 1994.
- [4] G. I. Skanavi, Physics of Dielectrics: Strong-Field Region, Moscow, Russia: Fizmatlit, 1958.
- [5] V. Y. Ushakov, Insulation of High-Voltage Equipment (Power Systems), Berlin, Germany: Springer, 2004. (Translation from Russian edition, 1994).
- [6] R. A. Lipshtein, and M. I. Shakhnovish, Transformer Oil, 3rd ed., Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1983. (English translation of Transformer Oil, 2nd ed., Jerusalem, Israel: Israel Program for Scientific Translations, 1970).
- [7] V. Ya Ushakov, V. F. Klimkin, and S. M. Korobeynikov, Impulse Breakdown of Liquids, Berlin, Germany: Springer, 2007.
- [8] Power supply & x-ray tube in an integrated subsystem [Online]. Available: [http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Downloads/Monoblock\\_catalog.ashx](http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Downloads/Monoblock_catalog.ashx)
- [9] P. L. Bellaschi and W. L. Teague, "Dielectric Strength of Transformer Insulation," Electr. Eng., vol. 56, no. 1, pp. 164–171, Jan. 1937.
- [10] SL Series of high voltage power supplies [Online]. Available: <http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Products/SL.ashx>
- [11] Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes, ASTM D 1816-84a, 1990.
- [12] <http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Products/HVD.ashx>
- [13] Insulating Liquids—Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency, 2nd ed., IEC 156, 1995.
- [14] Insulation Liquid, by O. Hjortstam, T. Auletta, A. Jaksts, R. Liu, L. A. A. Pettersson, and L. Walfridsson (2008, Jun. 19), WIPO Patent Application WO/2008/071704.
- [15] J. G. Hwang, M. Zahn, F. M. O'Sullivan, L. A. A. Pettersson, O. Hjortstam, and R. Liu, "Electron scavenging by conductive nanoparticles in oil insulated power transformers," presented at 2009 Joint Electrostatics Conference, Boston, MA, Jun. 2009.

***Поведение высоковольтного кабеля источника питания при коротком замыкании и связанные явления. Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE). Труды по диэлектрикам и электрической изоляции***

Алекс Покрываило (Alex Pokryvailo), Костел Карп (Costel Carp) и Клифф Скапеллати (Cliff Scapellati)

**Аннотация.** Разрядка при напряжениях, близких к предельным рабочим, неизбежна во многих высоковольтных нагрузках. Такими нагрузками могут быть, например, вакуумные промежутки рентгеновских трубок. В случае вакуумного промежутка характеристики разрядки зависят не только от состояния нагрузки, но и от внешних цепей. В кабельных соединениях важна длина кабеля. Длинные кабели способны уменьшать пробивное напряжение, что в литературе обычно игнорируется. Рассмотрены отобранные экспериментальные данные и средства улучшения эксплуатационных характеристик. В зависимости от способов кабельных соединений рассмотрены два случая. В первом, постоянном соединении, кабельный экран на обеих сторонах соединен с землей. Поэтому происходящие в кабеле процессы можно описывать обычными уравнениями для длинных линий. Форма колебаний бегущих волн, развивающихся на стороне источника питания в условиях коротких замыканий и перенапряжений (OV), представляется в функции параметров кабеля. Во втором случае экран на стороне источника питания заземлен, а на стороне нагрузки он не присоединен (соединение с незаделанным экраном). Показано, что обычная модель двухпроводной линии передачи больше не применима. Средствами PSpice выполнены разработка и анализ эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами.

Показано, что изоляция кабеля подвергается перегрузкам на стороне нагрузки в соединениях с незаделанным экраном, и на стороне источника питания в постоянных соединениях. Представлены экспериментальные результаты, полученные на низковольтных моделях.

**Ключевые слова:** высоковольтный кабель, изоляция, короткое замыкание, перенапряжения, рентгеновская трубка

## 1 ВВЕДЕНИЕ

### 1.1 Общие сведения

Разряды в высоковольтных нагрузках при напряжениях, близких к их предельным рабочим значениям практически неизбежны. В состав таких нагрузок могут входить вакуумные приборы, в частности рентгеновские трубки. Характеристики разряда зависят не только от нагрузки, но и в значительной степени от внешних цепей, а именно от соединенной непосредственно с нагрузкой емкости или ограничительного импеданса, если он имеется. Влияние внешней цепи

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Научные статьи

наиболее сильно проявляется в случае нагрузки с вакуумным прибором; оно сказывается намного меньше, если в составе нагрузки используются приборы, содержащие газ при атмосферном давлении.

Очень часто нагрузку соединяют с источником высоковольтного питания (HVPS) посредством длинного высоковольтного кабеля. Экран кабеля может быть заземлен а) на обеих сторонах или б) только на стороне высоковольтного источника питания. Последнее мы будем называть «соединением с незаделанным экраном». Для ясности отметим, что в этой статье рассматриваются только коаксиальные кабели. К этой категории также относятся кабели с несколькими внутренними проводниками, которые могут использоваться для питания цепей накала и сетки. Для случая а) происходящие в кабеле процессы можно описывать обычными уравнениями для длинных линий (см., например, [1], [2]). Далее будет показано, что для соединений с незаделанным экраном эти уравнения в обычном виде неприменимы. Нам неизвестны публикации с анализом таких соединений.

### 1.2 Нагрузка с вакуумным прибором

Как отмечено выше, мы выбираем вакуумные промежутки по причине наибольшей чувствительности их характеристик разрядки к схеме питания. Авторы хорошо осведомлены о рентгеновских трубках и их высоковольтных источниках питания; поэтому далее рассмотрены в основном эти устройства.

Хотя теория разрядки в вакууме далека от завершенности [3]–[8], с точки зрения электромагнитных помех (ЭМП) мы будем различать а) микроразряды и б) искровые разряды. (Здесь в основном используется терминология [3], [8].) Первые характеризуются незначительными падениями напряжения, тогда как искровой разряд полностью разряжает соединенные с нагрузкой емкости. Будем называть сумму этих емкостей «выходной емкостью»,  $C_{out}$ . Если высоковольтный источник питания не ограничивает ток до определенного уровня или не выключается, искровой разряд может переходить в дуговой.

Микроразряды могут быть слабыми (миллиамперы) и, как таковые, не вызывать серьезные неисправности. Однако более интенсивные микроразряды также обычны [3] (см. также [8] стр. 24). Напряжении нагрузки полностью не пропадает, но паразитные токи разрядки являются намного более значительными, превышая уровни амперов, и могут приводить к сбоям в работе чувствительных электронных приборов [9]. Микроразряды в рентгеновских трубках часто связаны с наличием остаточного газа.

Искровые разряды связаны с короткими пикосекундными импульсами тока, амплитуда которых может достигать нескольких кА. Время нарастания тока зависит от скорости образования моста при прохождении фронта плазмы в промежутке. В настоящее время существует сложившееся на основании большого объема экспериментальной работы общее мнение, что для промежутков сантиметровой длины эта скорость обычно составляет 2 см/пс. Исходя из вышеизложенного, время «закрытия» вакуумного промежутка



**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи**

можно оценить с высокой достоверной вероятностью; время нарастания тока, очевидно, короче и зависит также от непосредственно связанной с электродами емкости  $C_{out}$ . Амплитуда тока  $I_m$  возрастает вместе с  $C_{out}$  и, согласно одной из популярных теорий, начиная с некоторого значения  $C_{out}$  приблизительно пропорциональна  $C_{out}^2$ :  $I_m \sim C_{out}^2$  [10].

Отметим, что в жидких и твердых диэлектриках пробой развигается намного быстрее, чем в вакууме. Это также справедливо для газов при относительно высоком давлении. Например, в воздухе при атмосферном давлении и выше мосты в промежутках средней длины образуются значительно быстрее вследствие высокой скорости стримерного распространения (порядка  $10^7$ – $10^8$  см/с при атмосферном давлении, в зависимости от параметров промежутка и напряжения; см., например, [11], [12] и их библиографию) и более быстрого развития искрового разряда.

Еще одной важной особенностью искрового пробоя в вакууме является уменьшение напряжения пробоя  $V_{br}$  с увеличением  $C_{out}$ . При использовании в рентгеновских установках длинных высоковольтных кабелей падение  $V_{br}$  сильно заметно. Мы наблюдали, например, что для трубки с номиналом 70 кВ и 15-метрового кабеля с резиновой изоляцией  $V_{br}$  падало с 70 кВ до значения ниже 55 кВ. Для других трубок  $V_{br}$  составило 25–35 кВ и 45–50 кВ с кабелями длиной 9 м и 3 м соответственно [9].

Убедительное доказательство влияния внешней схемы на пробивное напряжение вакуумного промежутка дано в [3] (см. также [13]). Обнаружено, что даже небольшое сопротивление, разделяющее  $C_{out}$  и промежуток, увеличивает  $V_{br}$  на десятки процентов. Снижение запасаемой энергии также благоприятно действовало на электрическую прочность диэлектрика промежутков в определенных условиях. Наша экспериментальная работа согласуется с этими данными (см. раздел 4).

**1.3 Влияние длины высоковольтного кабеля на электромагнитные процессы**

Для учета влияния высоковольтного кабеля на электромагнитные процессы простейшим приближением является представление кабеля в виде паразитной емкости. Это упрощение работает весьма хорошо для почти всех случаев, кроме коротких переходных явлений; причина последнего заключается в том, что электрическая длина кабеля может быть соизмерима со временем поверхностного перекрытия промежутка. В этом случае правильнее представлять кабель в виде длинной линии с характеристическим импедансом  $Z$  и скоростью распространения  $v$  (потерями можно пренебречь, если кабель не очень длинный). Скорость распространения равна  $v = c/\sqrt{\epsilon}$ , где  $\epsilon$  есть относительная диэлектрическая проницаемость кабельной изоляции при условии, что кабель не содержит ферромагнитные материалы;  $c$  — скорость света. В этом разделе приняты значения  $Z = 59$  Ом и  $\epsilon = 3,15$ . Первое взято из технических характеристик кабеля 2042 Dielectric Sciences [14], второе есть значение, вычисляемое исходя из емкости и геометрии кабеля, для этого же кабеля. Таким образом, для прохождения 1 м в кабеле 2042 волне необходимо время, равное  $\tau = 5,3$  нс.

Для короткого кабеля все переходные процессы могут затухать до образования в промежутке плазменного моста, и разряд может не переходить в искровой. Для более длинных кабелей имеется больше времени для распространения плазмы в условиях поддержания за счет энергии в кабеле. Рассмотрим пример. Для типичного для некоторых рентгеновских трубок номиналом 150 кВ промежутка 2 см необходимое для полного образования плазменного моста время составляет  $\sim 1$  пс, и оно значительно меньше для газовых промежутков при атмосферном давлении и выше. Время нарастания тока значительно короче [3], [6]–[8]. Кабель длиной 3 м способен поддерживать разряд в течение всего  $3\tau \approx 16$  нс, тогда как для кабеля длиной 15 м этот интервал составляет 79 нс. Отметим, что трехметровый кабель может быть «коротким» для нагрузки с вакуумным прибором, но быть достаточно «длинным» для нагрузки с разрядом в газе высокого давления. Эти аргументы, хотя и слишком упрощенно, указывают на решающее значение длины кабеля.

Отметим, что кабель ограничивает ток разрядки до значения  $I_m = V/Z$ , где  $V$  — напряжение зарядки.

Само по себе присутствие длинных высоковольтных кабелей имеет огромное влияние на диэлектрическое поведение высоковольтных нагрузок, особенно вакуумных промежутков, а также на происходящие в результате пробоя нагрузки перенапряжения в высоковольтных источниках питания. Характер и абсолютное значение перенапряжения зависят от метода кабельного соединения. Эти факторы, обыкновенно игнорируемые в литературе, рассмотрены в следующих разделах (см. также [15]).

**2 ОСНОВНОЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ С ЗАЗЕМЛЕННЫМ ЭКРАНОМ НА ОБОИХ КОНЦАХ (ПОСТОЯННОЕ СОЕДИНЕНИЕ)**

Во многих высоковольтных системах экран кабеля заземлен на обоих концах. Тогда если нагрузка замкнута накоротко, кабель разряжается таким образом, что и напряжение, и ток отражаются от обоих концов с изменениями полярности. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет рассеяна вся энергия, главным образом в виде тепла. Этот случай имеет аналитическое решение, которое можно найти в другом источнике [16], [17]. Мы используем модели PSpice. Многократные отражения иллюстрируются формами колебаний на рисунке 1. Здесь мы принимаем, что заряжающий источник питания  $V1$  изолирован от кабеля, что типично для высоковольтных источников питания, снабженных средствами ограничения дугового разряда. Примечательно, что напряжение в кабеле начинает содержать высокочастотную составляющую, вредную для изоляции.

Отражения менее интенсивны, если линия короче, и (или) время перехода больше. Они исчезают после некоторой критической длины, в этом случае меньше 3 м. На рисунке 2 показана зависимость пикового напряжения при изменениях полярности и пикового тока разрядки в зависимости от длины кабеля (относится к напряжению зарядки 100 кВ). Видно, что при большей длине пиковое напряжение при изменениях полярности и максимальный ток разрядки приближаются к своим теоретическим предельным значениям.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

3 ПЕРЕХОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СОЕДИНЕНИЯХ С НЕЗАДЕЛАННЫМ ЭКРАНОМ

3.1 Теоретическая часть

Экран кабеля не заземляется на стороне нагрузки во многих применениях, например при электростатическом осаждении и ионной имплантации, а также при высоковольтных испытаниях и в общей лабораторной практике. Это происходит потому, что, несмотря на практическую важность этого случая, его анализ в доступной литературе отсутствует.

Основное предположение при получении уравнений длинной линии для двухпроводной линии передачи заключается в том, что в обоих проводниках существуют только дифференциальные токи, равные друг другу в каждой точке [1], [2], [16]. В связи с этим модели длинных линий в PSpice полагают, что это имеет место и, следовательно, стараются на одном конце вставить между экраном и землей импеданс, что приводит к абсурдным результатам. Однако соединение незаделанным экраном представляет именно такую ситуацию! Если экран оторван от земли, что на рисунке 1 изображено волнистой линией, ток в экране на этом конце нулевой, но его аналог во внутреннем проводнике не нулевой. Фактически при соединении с незаделанным экраном мы имеем дело с трехпроводной линией передачи, третьим проводником является земля. Для следующего уровня сложности отметим, что при расположении кабеля далеко от земли такая линия может не поддерживать моды поперечных электромагнитных колебаний, что означает соизмеримость поперечных расстояний с длиной волны. В таком случае экран может действовать как антенна. Однако пренебрегая токами смещения, протекающими от экрана на землю и между соседними частями самого экрана (в случае смотанного в бухту кабеля), можно оставаться в пределах удобной простоты аппроксимации двухпроводной линии. Покажем, что такое упрощение все еще позволяет анализировать характерные явления пробоя нагрузки при соединении с незаделанным экраном.

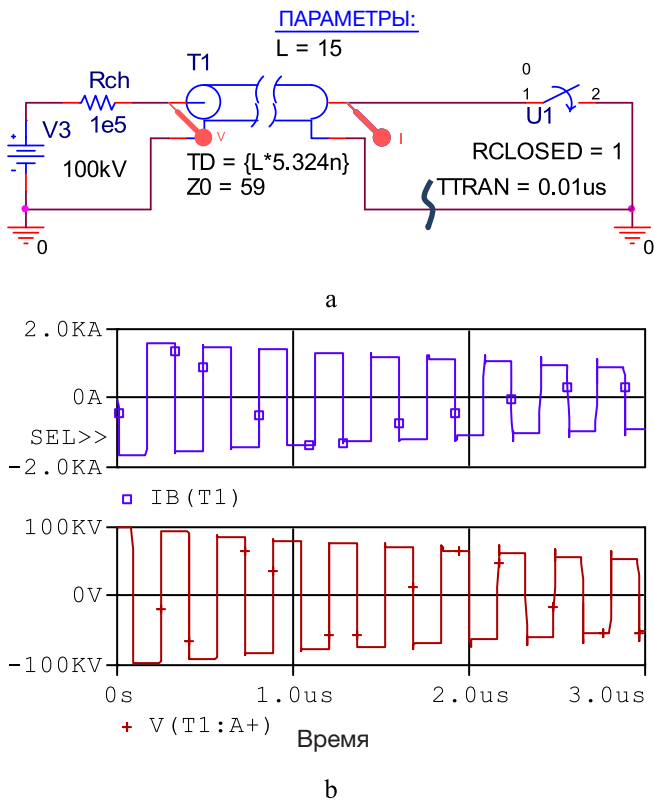


Рисунок 1. а — модель PSpice для разрядки 15-метрового кабеля 2042 в цепь короткого замыкания. Время закрытия/переходного процесса переключателя, TTRAN, является параметром PSpice; оно намного короче, чем электрическая длина кабеля. б — диаграммы синхронизации. Амплитуда тока равна V/Z

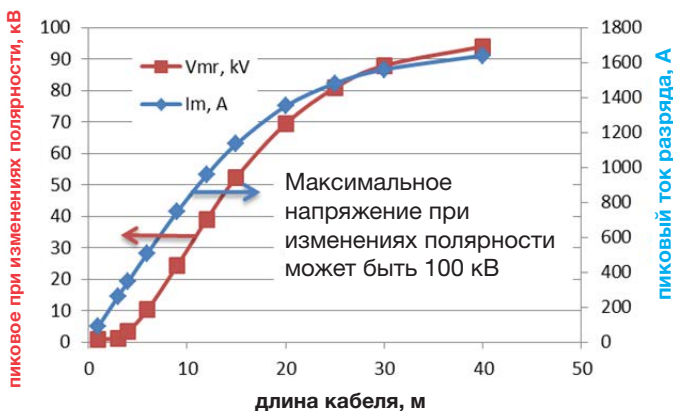


Рисунок 2. Зависимость пикового напряжения при изменениях полярности и пикового тока разрядки (V(T1:A+) и IB(T1) соответственно, по обозначениям на рисунке 1) от длины кабеля (относится к напряжению зарядки 100 кВ). В этих моделях время закрытия/переходного процесса переключателя TTRAN = 1 мкс (фактический переход от 90 % до 10 % занимает 200 нс)

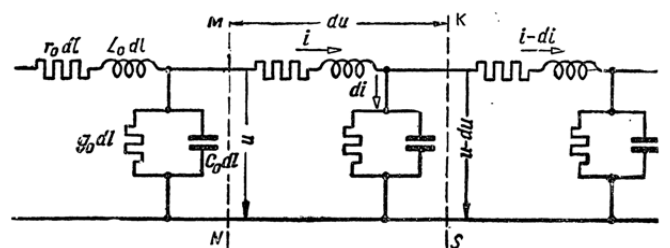


Рисунок 3. Представление двухпроводной длинной линии с сосредоточенными параметрами (взято из [16]). L0, C0, r0 и G0 представляют соответственно индуктивность, емкость, сопротивление и проводимость длинной линии на единицу длины

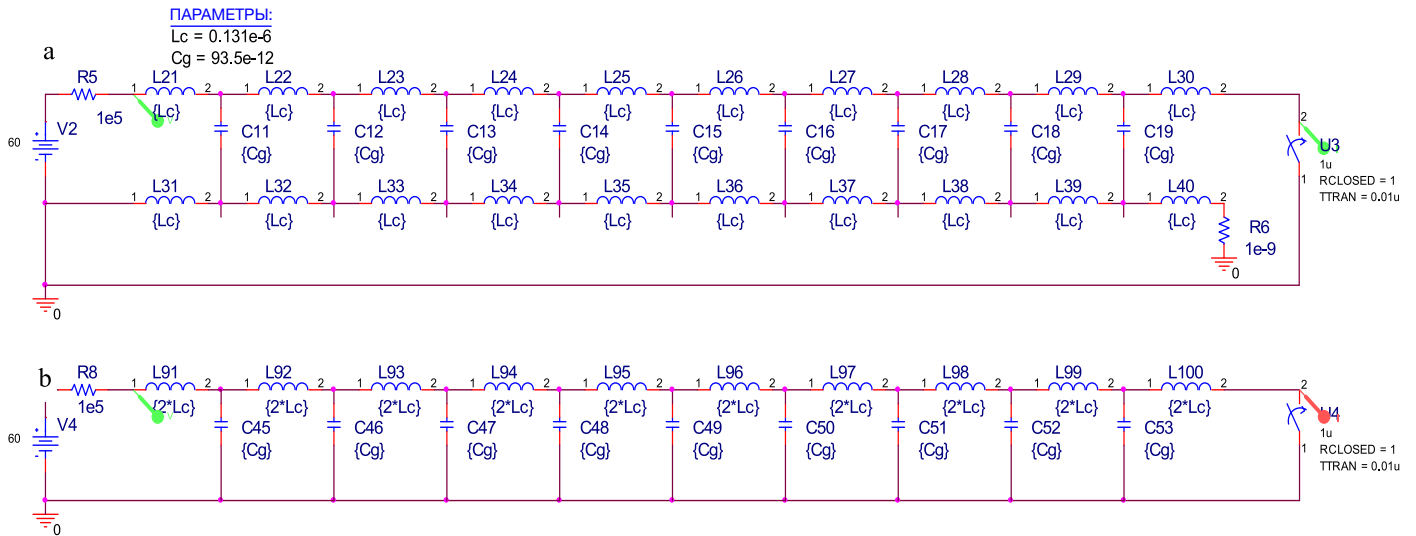
Будем пользоваться моделью схемы с сосредоточенными параметрами, одной из причин этого является возможность такого моделирования средствами PSpice. Сначала рассмотрим приведенную на рисунке 3 обычную эквивалентную схему, используемую для получения уравнений длинной линии. Такие схемы (цепи формирования импульсов) также

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

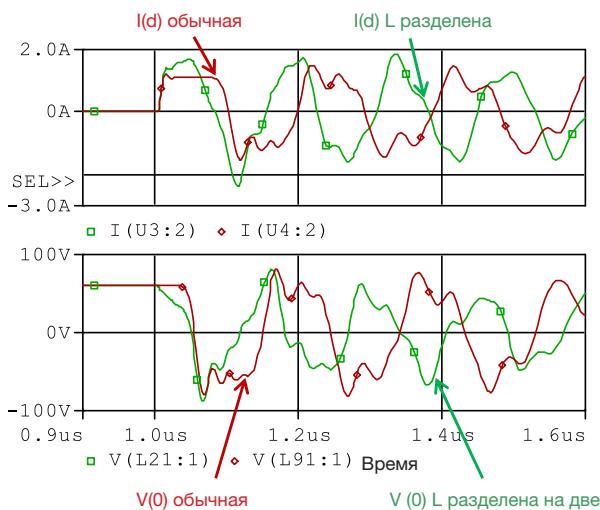
Научные статьи

применяют для генерации прямоугольных импульсов. Отметим, что возвратный проводник представлен только проводом; все импедансы сосредоточены в прямом проводнике и, следовательно, токи в обоих равные. Такую модель невозможно использовать для получения нулевого тока в изолированном экране в дальнем конце для короткозамкнутой

цепи. Разделим индуктивность на две между прямым и обратным проводами так, чтобы полная индуктивность элементарной ячейки оставалась прежней. На рисунке 4а показана такая модель для 10-метрового кабеля RG-58/U (потери пренебрегаем); на рисунке 4б показана модель того же кабеля в обычном представлении.

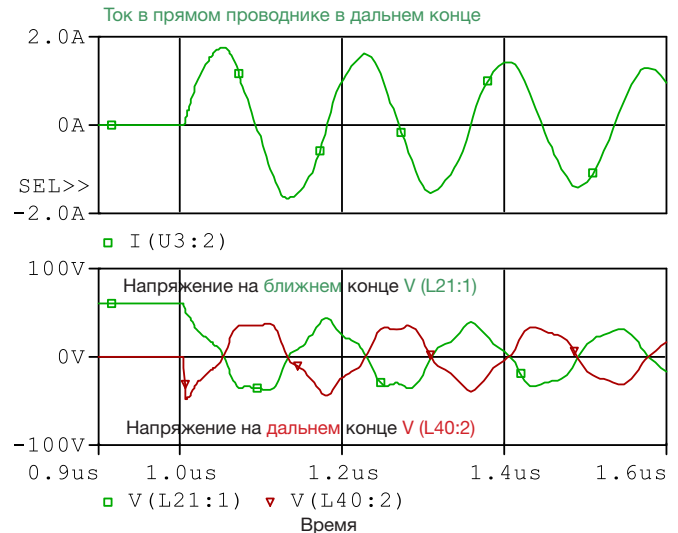


**Рисунок 4. Модель с сосредоточенными параметрами для 10-метрового кабеля RG-58/U, выполненная в PSpice.**  
а — экран изолирован на дальнем конце. Индуктивность элементарной ячейки разделена на две; б — обычная модель длинной линии без потерь. Параметры RG-58/U, взятые из каталога Belden [19]:  $L = 262$  мкГн/м,  $C = 93,5$  пФ/м



**Рисунок 5. Моделирование схемы, изображенной на рисунке 4.**  
 $R6 = 10^{-9}$  Ом (экран заземлен на дальнем конце)

На рисунке 5 показаны результаты моделирования для цепей, изображенных на рисунках 4а, б для  $R6 = 10^{-9}$  Ом, т.е. экран заземлен на дальнем конце. Цепь на рисунке 4б генерирует обычные квазипрямоугольные формы колебаний (сравните с их экспериментальными аналогами ниже), как и должно быть в любой цепи формирования импульсов. Однако схема, изображенная на рисунке 4а, отличаясь только тем, что



**Рисунок 6. Моделирование схемы, изображенной на рисунке 4а.**  
 $R6 = 10^9$  Ом (экран на дальнем конце изолирован)

индуктивность элементарной ячейки разделена на две, бросает вызов здравому смыслу, генерируя колебания треугольной формы вместо прямоугольных.

На рисунке 6 показана модель для схемы, изображенной на рисунке 4а, для  $R6 = 10^9$  Ом (соединение с незаземленным экраном). Видно, что при закрытии переключателя напряжение на экране в дальнем конце скачком возрастает

ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Научные статьи

до напряжения источника питания, после чего начинается колебательный процесс. Таким образом, при соединении с незаделанным экраном изоляция на обеих сторонах кабеля подвергается воздействиям полных изменений полярности напряжения. Это приводит к большим перегрузкам на концах кабелей [18].

3.2 Экспериментальная часть

Принципиальная схема низковольтной испытательной установки показана на рисунке 7. Два отрезка кабелей RG-58 длиной приблизительно 5,5 (полная длина приблизительно 11 м, электрическая длина приблизительно 58 нс) соединенные тройником типа BNC, заряжались до 60 В через высокоомный ограничивающий резистор. Кабель был смотан в бухту и помещен на алюминиевую пластину, соединенную с системной землей. Длинная линия разряжалась на землю в циклическом режиме с использованием быстродействующего МОП-транзистора IRFD110 (фактическое время переключения с жестким запирающим без запирающего резистора было меньше 5 нс см. рисунок 8). Контроль напряжений на длинной линии осуществлялся с помощью осциллографа DPO7054 с щупами P6139A 400 МГц в трех точках: в начале длинной линии  $V(0)$ , на половинной длине  $V(d/2)$ , и на дальнем конце  $V(d)$ .

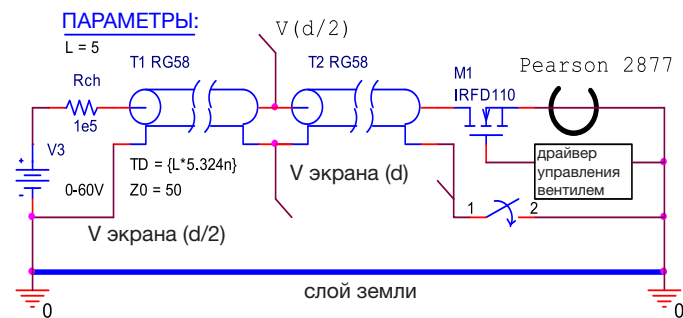


Рисунок 7. Экспериментальная схема

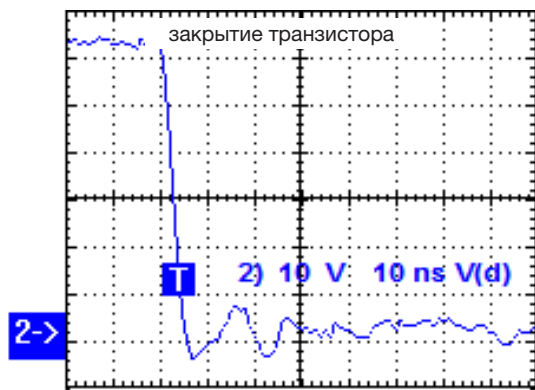


Рисунок 8. Закрывание транзистора. В пояснениях к формам колебаний здесь и далее приведены масштаб (по вертикали 10 В/дел., по горизонтали 10 нс/дел.) и легенда

Потенциал экрана в этих точках обозначен как  $V$  экрана (0),  $V$  экрана ( $d/2$ ) и  $V$  экрана ( $d$ ) соответственно. Также осуществлялся контроль тока в дальнем и (или) ближнем конце

посредством трансформаторов тока Pearson 2877 и 2878 (время нарастания 2 нс и 4 нс соответственно). Отметим, что свернутый в кольцо и помещенный на заземленную пластину кабель вносит значительную емкость экрана кабеля как относительно земли, так и между соседними частями экрана непосредственно.

Опорный эксперимент заключался в коротком замыкании линии на соединенный с землей экран на дальнем конце. На рисунке 9 представлены формы колебаний с ожидаемыми квазипрямоугольными импульсами и почти полным изменением полярности напряжения и тока в ближнем и дальнем концах соответственно.

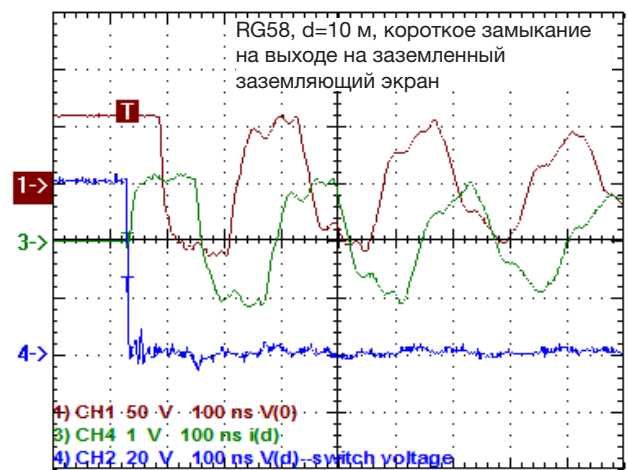


Рисунок 9. Короткое замыкание на землю, экран замкнут накоротко на ближнем и дальнем концах. Развертка 1 (Ch1) — напряжение на ближнем конце; Развертка 3 (Ch4) — ток в дальнем конце, 1 А/дел.; Развертка 4 (Ch2) — напряжение на дальнем конце (напряжение переключателя). Развертка по горизонтали 100 мкс/дел.

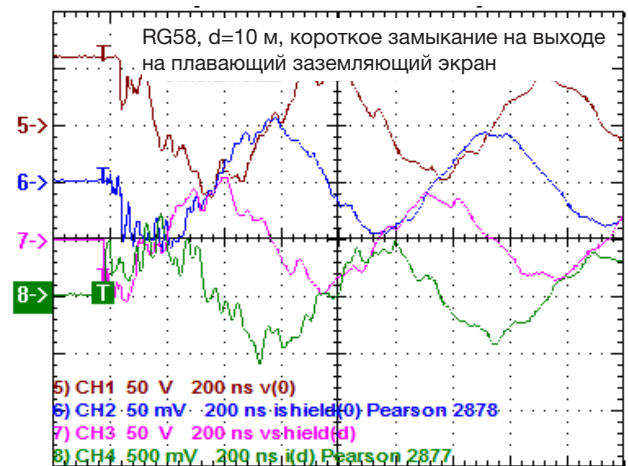


Рисунок 10. Короткое замыкание на землю, экран на дальнем конце — плавающий. Развертка 5 (Ch1) — напряжение на ближнем конце; Развертка 6 (Ch2) — ток в дальнем конце, 0,5/дел.; Развертка 7 (Ch3) — напряжение на экране на дальнем конце; Развертка 8 (Ch4) — ток в дальнем конце, 0,5/дел.; Развертка по горизонтали 200 мкс/дел.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

### Научные статьи

Для экрана, изолированного от земли на дальнем конце, картина совершенно иная. Так как электрический заряд экрана не может исчезнуть мгновенно, полное напряжение на линии генерируется между экраном и землей на дальнем конце. На этом конце бегущие волны с полной сменой полярности напряжения затухают медленно. Поэтому если нагрузка искрит, изоляция кабеля при соединении с незаделанным экраном подвергается пагубному воздействию. Как показано в [18], изоляция в конце экрана чрезвычайно уязвима, и, несомненно, страдает от высокочастотных составляющих напряжения. Экран также может искрить на землю, создавая интенсивные ЭМП, усугубляемые тем, что контур тока разрядки обычно бывает большим. Излучаемое поле может вызывать пагубные результаты на системном уровне. Подробный анализ этих влияний выходит за рамки настоящей статьи.

#### 4 СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ПРОБИВНОГО НАПЯЖЕНИЯ

Обычно в высоковольтных источниках питания предусматривают ограничители дугового разряда на выходе перед высоковольтным кабелем. При разряде энергии, запасенной в выходных каскадах высоковольтного источника питания, они ограничивают возникающий ток до уровня, безопасного как для нагрузки, так и для самого источника питания. В самом простом случае ограничитель дугового разряда представляет высоковольтный резистор. Более сложные ограничители, состоящие из индуктивностей, резисторов и т.п., также находят применение, особенно в высоковольтных источниках питания с высоким током. Однако обычные ограничители не предотвращают поток энергии от кабеля, который уменьшает  $V_{br}$ , как отмечено в предыдущих разделах. Очевидным решением этой проблемы была бы установка токоограничительного устройства между кабелем и нагрузкой. Здесь существуют технические трудности двух видов. Во-первых, крайняя ограниченность пространства. Во-вторых, питание нити накала в рентгеновской установке обычно осуществляется высокочастотным током, и ограничитель должен пропускать ток нити без создания чрезмерно высокого падения напряжения и потерь мощности.

Средства увеличения пробивного напряжения рентгеновской трубки с питанием от высоковольтного источника питания через длинный кабель показаны на рисунке 11. Электрическая и механическая разработка ограничителя, его выполнение и испытания описаны в [9], [20]; смотрите также в [21] еще одно схемное решение. В одном из рентгеновских генераторов двухобмоточный дроссель диаметром 35 мм и длиной 40 мм имел индуктивность  $L_{ch} = 200$  мкГн (измерена для одной обмотки). Он представлял очень низкий импеданс для тока нити накала, но высокий импеданс для токов разрядки. Принимая значение характеристической частоты последнего  $f = 1$  МГц, что соответствует времени нарастания порядка долей микросекунды, вычисляем  $Z = 2\pi f L_{ch} = 1,256$  кОм. (Подобные и даже более низкие значения сопротивления были очень эффективны при подавлении пробоя в вакууме [3].) Дроссель был установлен в экране трубки между втулкой кабельного ввода и трубкой. Он практически исключил микроразряды

в трубке, которые в иных случаях серьезно дестабилизировали ее работу. Косвенно эффективность ограничения тока можно оценить с помощью измерительного электромагнитного датчика с рамочной антенной приблизительно  $500 \text{ см}^2$ , помещаемой в непосредственной близости от высоковольтного кабеля. Без дросселя типичный выходной сигнал равнялся 10 В, а с дросселем амплитуда падала на два порядка, и частота событий была также на порядки ниже.

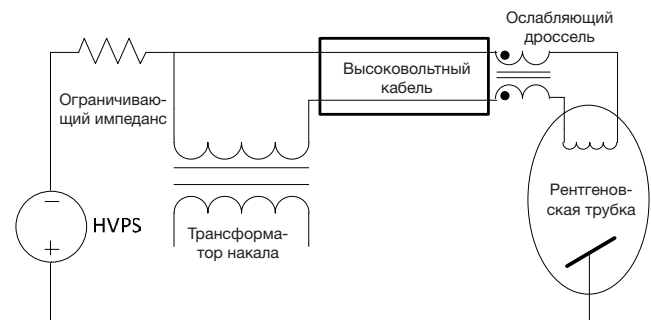


Рисунок 11. Сифазно включенный дроссель в качестве ограничителя дугового разряда в высоковольтном источнике питания рентгеновской установки

#### 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проектировщик должен быть осведомлен о сложностях, связанных с длинными высоковольтными кабелями. Эти сложности заключаются в низком пробивном напряжении, высоких разрушающих нагрузках на изоляцию и высоких ЭМП. Если последнее более очевидно (чем больше запасаемая энергия, тем выше токи разрядки), то первым двум факторам обычно не придают значения.
2. При использовании постоянного соединения длинных высоковольтных кабелей изоляция подвергается перегрузкам вследствие быстрых изменений полярности напряжения на стороне высоковольтного источника питания.
3. При соединении с незаделанным экраном явления в короткозамкнутой цепи не вполне описываются уравнениями длинной линии; изоляция кабеля подвергается пере-напряжениям вследствие быстрых изменений полярности напряжения на стороне нагрузки. В этом случае, если используется длинный кабель, заделку его конца нужно проектировать более тщательно по сравнению с постоянным соединением.
4. Пробивное напряжение нагрузки можно значительно увеличить путем включения низкого импеданса между кабелем и нагрузкой. Для нагрузок с потреблением высокого тока весьма эффективны индукторы с небольшими значениями индуктивности (десятки — сотни пГн).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] G. Miano and A. Maffucci, Transmission Lines and Lumped Circuits, Academic Press, NY, 2001.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи**

**Алекс Покрывайло** (M'05-SM'07) родился в России, в городе Выборг. Он получил степени к.т.н. и д.т.н. в области электротехники в Ленинградском политехническом институте в 1975 и 1987 гг. соответственно. Прежде работал в Soreq NRC, Yavne, Израиль, сейчас является руководителем научно-исследовательских работ в Spellman High Voltage Electronics Corporation, Hauppauge, NY. Его текущие и недавние работы относятся к разработке мощных высоковольтных импульсных источников питания, импульсной мощности; особое внимание уделяется сильноточным открывающим и закрывающим коммутирующим устройствам и проектированию магнитных цепей, быстрой диагностике, и коронным разрядам. Ранее он изучал бездуговое переключение, разрабатывал элегазовую коммутационную аппаратуру, проводил исследование в области взаимодействия пламени с электромагнитными полями и т.д. Опубликовал свыше 100 статей, два учебника (на иврите), и более 20 патентов, относящихся к высоковольтной технике.

**Клифф Скапеллати** (M'92), фотография и биография ко времени публикации отсутствовали.

- [2] C. R. Paul, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, Wiley, NY, USA, 2008.
- [3] I.N. Slivkov, Electrical Breakdown of Vacuum, Energoatomizdat, Moscow, Russia, 1972 (In Russian).
- [4] J.M. Lafferty, Ed., Vacuum Arcs, Wiley, 1980.
- [5] R.L. Boxman, D. M. Sanders and P. J. Martin, Editors, Handbook of Vacuum Arc Science and Technology, Noyes Publications, NJ, USA, 1995.
- [6] G.A. Mesyats, "Ectons". In three parts, Nauka, Ekaterinburg, 1993 (in Russian).
- [7] G.A. Mesyats and D.I. Proskurovski, Pulsed Electrical Discharge in Vacuum", Springer-Verlag, 1989.
- [8] R. Latham, High Voltage Vacuum Insulation, Academic Press, San Diego, USA, 1995.
- [9] A. Pokryvailo, K.K. Vlasov, Yu. A. Magdin and A.N. Starchikov, "On the Electromagnetic Compatibility of High Voltage Power Supplies for X-Ray Analytical Apparatus Operating under Conditions of High Voltage Discharges", Instrumentation and Methods of X-Ray Analysis, Vol. 40, pp. 151-158, 1990.
- [10] P.T.G. Flynn, "The Discharge Mechanism in a Cold Cathode Pulsed XRay Tube", Proc. Phys. Soc. B (UK), Vol. 69, pp. 748-762, 1956.
- [11] E.M. Bazelyan and Yu.P. Raizer, Spark Discharge, CRC Press, NY, USA, 294 pp, 1998.
- [12] Yu. Raizer, Gas Discharge Physics, Springer, Berlin, Germany, 1991.
- [13] R. Hackam, "Effects of voltage polarity, electric current, external resistance, number of sparkings, supply frequency, and addition of hydrogen and air on electrical breakdown in vacuum", J. Appl. Phys., Vol. 46, pp. 3789-3799, 1975.
- [14] <http://dielectricsciences.thomasnet.com/Asset/2042.pdf>
- [15] A. Pokryvailo, and C. Scapellati, "Behavior of HV Cable at Short Circuit and Related Phenomena", IEEE Int'l. Power Modulator and High Voltage Conf. (IPMHVC), San Diego, USA, Paper 307, 2012.
- [16] K. A. Krug, Foundations of Electrotechnics, 6th ed., Vols. 1 and 2, Gosenergoizdat, Moscow, Russia, 1946.
- [17] G. A. Mesyats "Pulsed Power and Electronics", Moscow, Nauka, 2004 (in Russian). Translation to English: Pulsed Power, Kluwer, NY, 2005.
- [18] A. Pokryvailo, C. Carp and C. Scapellati, "Comparative Testing of Simple Terminations of High Voltage Cables", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 26, No. 1, pp. 7-17, 2010.
- [19] RG 58/U cable <https://edesk2.belden.com/Products/index.cfm?event=showproductdet ail&partid=1979>
- [20] A. Pokryvailo, and V. Resnik, "X-Ray Generator", Soviet Patent A.C.1628235, 1990.
- [21] A. Pokryvailo, and A. Starchikov, "X-Ray Generator", Soviet Patent A.C.1220141, 1985.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

## Научные статьи

### Анализ распределения электрического поля в неидеальной изоляции при постоянном токе<sup>1</sup>

Алекс Покрываило (Alex Pokryvailo)  
Spellman High Voltage Electronics Corporation

**Аннотация.** Довольно часто молодые инженеры-электрики не уделяют должного внимания влиянию утечки изоляции на электрическое распределение поля при постоянном токе или медленно изменяющемся напряжении. Заново рассмотрена классическая задача: распределение электрического поля между двумя бесконечными параллельными пластинами, разделенными двумя слоями изотропной изоляции. Приведен анализ систематических ошибок, возникающих вследствие некорректного применения граничного условия, действительного только для электростатики. Вместо него следует использовать более общее граничное условие. Оно получается из уравнения непрерывности тока в интегральном виде и выражается через нормальные составляющие плотности полного тока. Подход с использованием эквивалентной схемы полезен в качестве дополнительного метода анализа, особенно когда токи проводимости и смещения пропорциональны. Даны численные решения для двух систем изоляции, применяемых на практике.

#### I. ВВЕДЕНИЕ

Электрическая изоляция в высоковольтных установках подвергается воздействию напряжений с различными формами колебаний. Они занимают диапазон от нескольких МГц до 50/60 Гц напряжения переменного тока и от быстрых переходных процессов до напряжения постоянного тока. Для многих устройств обычны медленные переходные процессы. Например, мягкий запуск в высокопрецизионном источнике питания может продолжаться несколько десятков секунд. В том же источнике питания очень быстрые переходные процессы могут происходить во время пробоя нагрузки, например при искровом разряде в рентгеновской трубке. В применениях с импульсами большой длительности напряжение постоянного тока используется в широком диапазоне от микросекунд до нескольких миллисекунд, последнее характерно для компьютерной томографии.

Правильная разработка изоляции призывает к расчету электрического поля, который зависит не только от геометрии, свойств материалов, амплитуды напряжения и т. п., но также от формы колебаний напряжения. Для опытного инженера, работающего в области высоких напряжений, не возникают вопросы относительно различий между условиями распределения электрического поля при переменном напряжении, быстрых и медленных переходных процессах и в стационарном состоянии (постоянный ток) в идентичных системах изоляции. Конечно, в системах постоянного тока ток проводимости задает распределение поля, тогда как при быстрых переходных процессах и переменном токе, предположительно при

частоте сети 50 Гц и выше, токи смещения имеют основное значение. Иначе говоря, проводимость материала имеет главенствующее значение при постоянном токе, а диэлектрическая проницаемость материала — при переменном токе. Это хорошо известное правило [1–3].

Удивительно, что очень немногие из студентов, обучающихся на инженеров-электриков и прослушавших базовые университетские курсы по электромагнитным полям, идентифицируют или связывают вопросы электрических полей с проводимостью изоляции. То же справедливо в отношении молодых инженеров-электриков, специализирующихся в области высоких напряжений, и инженеров-электриков в целом. Еще более удивительно, что немало зрелых физиков, имеющих степени докторов наук, испытывают затруднения при попытке рассчитать распределение электрического поля в конденсаторе с многослойной изоляцией в условиях постоянного тока (см. ниже). Эта картина, наблюдаемая автором в течение многих лет профессионального общения и преподавания, ясно показывает существование зазора между курсами по электромагнитным полям и курсами по технике высоких напряжений, по крайней мере, на базовом университетском уровне. С другой стороны, необычно предлагать в таких курсах четкую, ясную формулировку различий между распределением электрического поля в реальной изоляции в стационарном состоянии и при переменном токе или в изменяющихся во времени условиях. Соответственно, суть этой наставнической статьи заключается в предложении такой формулировки; она может избавить молодых инженеров-электриков от некоторых неясностей и затруднений.

#### II. ПРИМЕР — ПЛОСКИЙ КОНДЕНСАТОР С МНОГОСЛОЙНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Рассмотрим снова классическую задачу, имеющую основополагающее значение в технике высоких напряжений: распределение электрического поля между двумя бесконечными параллельными пластинами, разделенными двумя слоями изотропной изоляции (рис. 1).

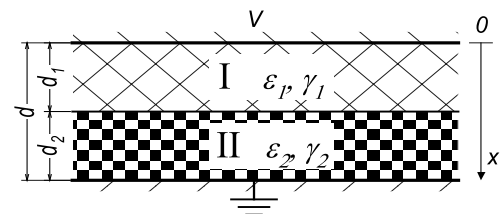


Рис. 1. Плоский конденсатор с двумя слоями неидеальной изотропной изоляции

Диэлектрики не идеальны, это выражается конечными значениями их проводимостей  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ . Прикладываемое к пластинам напряжение  $V$  может быть или постоянным  $V_0$  (случай постоянного тока), пилообразным, или синусоидальным в функции времени  $V = V_m \sin \omega t$ . Задачу можно упростить, приняв  $\omega = 2\pi 50$ , и задав для свойств материала определенные значения:  $\epsilon_1 = 2,3\epsilon_0$ ,  $\epsilon_2 = 5\epsilon_0$ , где  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  есть диэлектрические проницаемости диэлектриков I, II соответственно,

<sup>1</sup> Это пересмотренная версия доклада, представленного на выставке Electricmas 2008 в Квебеке 8-11 июня 2008 г.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

## Научные статьи

и  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость свободного пространства,  $\gamma_1=10^{-15}$  Ом $^{-1}$ м $^{-1}$ ,  $\gamma_2=10^{-12}$  Ом $^{-1}$ м $^{-1}$ . (Диэлектрик I может быть полиэтиленом и диэлектрик II может быть эпоксидным компаундом.) Образование пространственного заряда, зависимость свойств диэлектриков от температуры, частоты и поля и т. п. на этом этапе пренебрегаем. Таким образом, физически задача определена. Какие подходы обычно используются?

## А. Анализ поля

Безошибочно распознают, что задача описывается уравнением Лапласа в самом простом его виде:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\phi$  есть потенциал, а  $x$  — координата, как показано на рис. 1. Интегрируя (1) по слоям, быстро получают следующие соотношения:

$$E_1 = \text{const}, E_2 = \text{const}, \quad (2)$$

$$V = E_1 d_1 + E_2 d_2, \quad (3)$$

где  $E_1, E_2$  есть пока еще неизвестные составляющие электрического поля в слоях I, II соответственно. Чтобы найти соотношение  $E_1, E_2$ , необходимо граничное условие. Здесь случается обычная ошибка. Почти без исключений, граничное условие записывают в его самом простом и самом известном виде [1, 4, 5, 7, 8]

$$D_{n1} = D_{n2}, \text{ or } \epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2}, \quad (4)$$

где  $D_{n1}, D_{n2}$  и  $E_{n1}, E_{n2}$  есть нормальные составляющие вектора смещения и электрического поля соответственно. Тангенциальные составляющие в этом случае равны нулю вследствие симметрии. Уравнение (3), (4) дает решение [4, пар. 4.3.1]:

$$E_1 = \frac{V}{d_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} d_2}, E_2 = \frac{V}{d_1 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + d_2}, \quad (5)$$

которое весьма приемлемо для принятых значений при 50 Гц, так как ток проводимости по сравнению с током смещения незначителен. Отметим, что эта идея обычно ускользает от студентов, так как они следуют граничному условию (4), которое совершенно не учитывает проводимость.

Однако (4) и (5) неприменимы для случая постоянного тока (и, при строгом подходе, вообще, если проводимости не равны нулю), потому что поверхностный заряд существует на границе между диэлектриками. Нормальные составляющие напряженности электрического поля связаны следующим образом:

$$\epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2} + \sigma, \quad (6)$$

где  $\sigma$  есть плотность поверхностного заряда. Отметим, что (6) представляет правильное граничное условие для электростатической задачи только тогда, когда задан  $\sigma$ . В ином случае (6) служит исключительно для вычисления  $\sigma$  после того

как будет найдено распределение поля [6]. Этот пункт почти неизменно пропускают.

Более общее граничное условие, которое получается из уравнения непрерывности тока в интегральной форме

$$\oint_A \delta d\mathbf{A} = 0 \quad (7)$$

выражается через нормальные составляющие плотности тока  $\delta$ :

$$\delta_{n1} = \delta_{n2}, \quad (8)$$

или

$$\gamma_1 E_{n1} + \epsilon_1 \frac{\partial E_{n1}}{\partial t} = \gamma_2 E_{n2} + \epsilon_2 \frac{\partial E_{n2}}{\partial t}. \quad (9)$$

Для колебаний синусоидальной формы, (9) преобразуется в

$$\gamma_1 + j\epsilon_1 \omega E_{n1} = (\gamma_2 + j\epsilon_2 \omega) E_{n2}. \quad (9a)$$

Отметим, что  $\delta$  учитывает механизмы проводимости (первый член в (9)) и смещения (второй член в (9)). Для большинства технических применений ток проводимости  $\gamma E$  также пренебрежимо мал по сравнению с током смещения

$$\epsilon \frac{\partial E}{\partial t} :$$

$$\gamma_i E_{ni} \ll \epsilon_i \frac{\partial E_{ni}}{\partial t}, i=1,2, \quad (10)$$

или наоборот:

$$\gamma_i E_{ni} \gg \epsilon_i \frac{\partial E_{ni}}{\partial t}, i=1,2, \quad (10a)$$

Если выполняется соотношение (10), выражение (9) преобразуется в упрощенный вид (4), в котором обычно применяется для задач поля высокого напряжения при частотах 50/60 Гц и выше. Для этого случая исследования (50 Гц), отношение амплитуд токов смещения и проводимости для слоев I, II составляет  $6,39 \cdot 10^6$  и  $1,39 \cdot 10^4$  соответственно.

В поле постоянного тока производные по времени равны нулю; поэтому граничное условие (9) содержит только проводимости сред:

$$\gamma_1 E_{n1} = \gamma_2 E_{n2}. \quad (11)$$

Так как для исследуемой задачи  $\gamma_1 \ll \gamma_2$ , напряженность в первом слое намного больше, чем во втором:  $E_{n1} \gg E_{n2}$ , и если  $d_1$  и  $d_2$  соизмеримы, решение получается непосредственно из (3):

$$E_1 \approx \frac{V}{d_1}, E_2 \approx \frac{\gamma_1}{\gamma_2} E_1 = 0.001 E_1.$$



Научные статьи

Точное решение идентично (5), где диэлектрические проницаемости заменяются на проводимости:

$$E_1 = \frac{V}{d_1 + \frac{\gamma_1}{\gamma_2} d_2}, E_2 = \frac{V}{d_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} + d_2} \quad (12)$$

Уравнение (11) представляет хорошо известное граничное условие, которое применяют в задачах для статического поля в проводящих средах. Однако, как уже говорилось, данную задачу на рис. 1, где показаны кажущиеся изолирующими материалы, студенты не в состоянии связать с правильным граничным условием (11). Большинство из них на предшествующих курсах не получило представления о более общем граничном условии (9).

**В. Эквивалентные схемы**

Более простой подход, не рассматривающий количественные характеристики поля, использует эквивалентные схемы; по очевидным причинам этот подход более привлекателен для инженеров-электриков, чем для физиков. Быстрый взгляд на рис. 1 дает эквивалентную схему на рис. 2, где

$$R_1 = \frac{d_1}{\gamma_1}, R_2 = \frac{d_2}{\gamma_2}, C_1 = \frac{\epsilon_1}{d_1}, C_2 = \frac{\epsilon_2}{d_2} \quad (13)$$

есть сопротивления и емкости слоев на единицу поверхности.

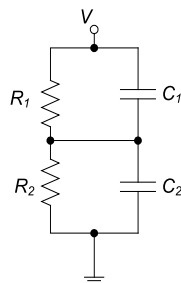


Рис. 2. Эквивалентная схема для плоского конденсатора с двумя слоями неидеальных изоляторов

Решение соответствующих дифференциальных уравнений обеспечивает решение для напряжения V с произвольной формой колебаний, позволяя найти напряжения на компонентах схемы и, следовательно, на слоях изоляторов. На рис. 3а показано распределение напряжения по слою толщиной 1 см в применении с «длительным» импульсом с «медленным» 30-секундным линейным нарастанием, со свойствами материалов, определенными для рис. 1 (графика была легко получена с помощью решателя PSpice); на рис. 3б дано то же самое за исключением того, что проводимости переставлены:  $\gamma_1 = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ,  $\gamma_2 = 10^{-15} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ . Распределения напряжения на рис. 3а можно оценить, по меньшей мере, по переднему фронту, используя развертку по частоте на рис. 3с.

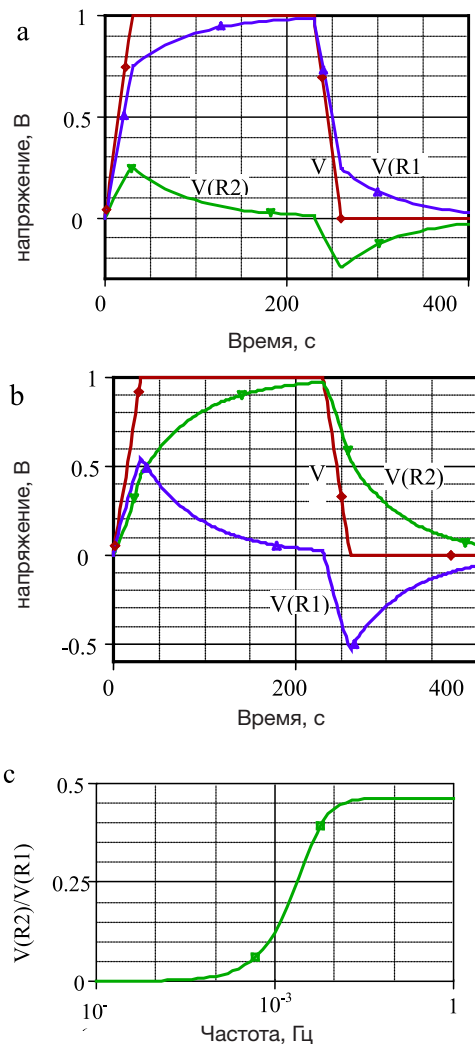


Рис. 3. Решение для эквивалентной схемы, показанной на рис. 2, для параметров, определенных для рис. 1.

Толщина слоя  $d_1 = d_2 = 0,01 \text{ м}$ ,  $\epsilon_1 = 2,3\epsilon_0$ ,  $\epsilon_2 = 5\epsilon_0$ ;  
 а —  $\gamma_1 = 10^{-15} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ,  $\gamma_2 = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , б —  $\gamma_1 = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ,  
 $\gamma_2 = 10^{-15} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , в —  $\gamma_1 = 10^{-15} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ,  $\gamma_2 = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

Настолько простой подход с использованием эквивалентной схемы не дает достаточного физического представления, и его следует использовать в качестве дополнительного метода в решении задач поля в средах с утечкой. В частности, образование поверхностного заряда, являющееся критическим для функционирования изоляции (оно отвечает за смену напряжения на рис. 3), полностью скрыто за уравнениями схемы. Кроме этого, в более сложных геометриях требующих численного анализа, схемный подход совершенно бесполезен; он не предлагает ориентира для формулирования задачи. Пара таких примеров дана в следующем разделе.

Научные статьи

III. ЧИСЛЕННЫЕ ПРИМЕРЫ

В первом примере используется катушка, намотанная на катушке из пластмассы высокого качества, например, полиэтилена ( $\epsilon_1 = 2,3\epsilon_0$ ), она дополнительно герметизирована в эпоксидной смоле ( $\epsilon_1 = 5\epsilon_0$ ). В приведенном ниже примере их проводимости относятся как 1 : 100 соответственно.

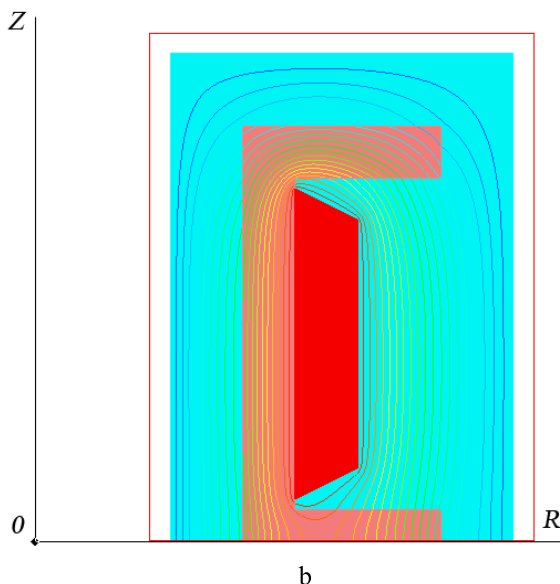
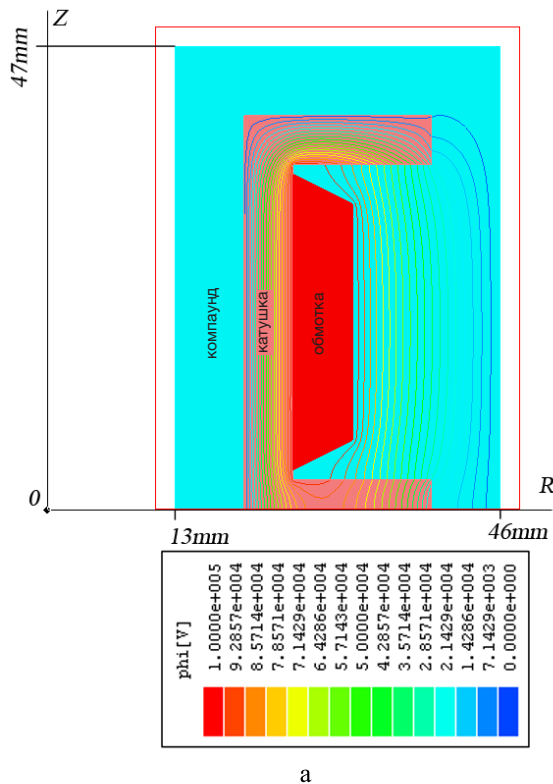


Рис. 4. Распределение электрического поля в герметизированной катушке. а — поле постоянного тока (задача проводимости); б — переменный ток (задача электростатики)

На рис. 4 показаны образцы поля в виде эквипотенциальных линий для случаев постоянного (а) и переменного (переходный процесс) (б) тока соответственно. Решение было получено с помощью программного обеспечения Maxwell 2D SV [9] в осесимметричной аппроксимации с размером сетки приблизительно 20 000 треугольников. По причине зеркальной симметрии изображения в R- $\theta$ -плоскости, моделирование выполнено только для половины катушки. На внешней границе поддерживается нулевой потенциал (кроме R- $\theta$ -плоскости, где нормальная составляющая E-вектора равна нулю), а к катушке приложено напряжение 100 кВ. Подобная задача рассматривалась в [10].

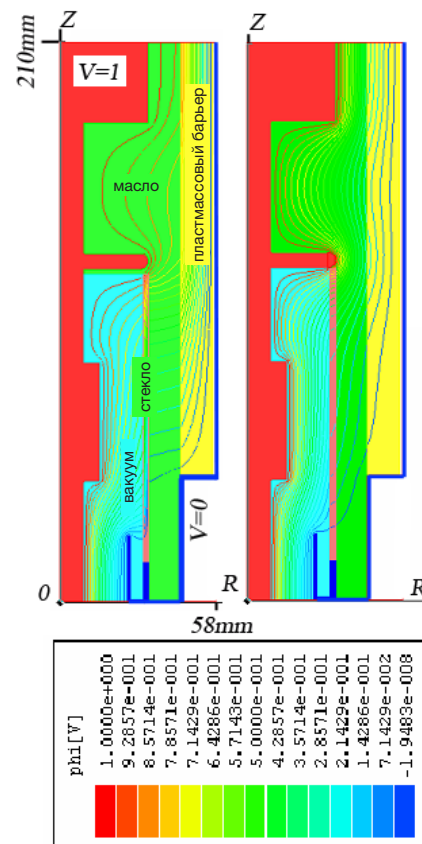


Рис. 5. Распределение электрического поля (случай постоянного тока слева, переменного — справа) в экранированной рентгеновской трубке

Для случая постоянного тока на рис. 4а большая разница проводимостей вынуждает поле концентрироваться в катушке, оставляя компанда около щечек и внутренней стороны (слева) сердцевины в значительной степени без воздействия. Подоплека этой конструкции заключается в разгрузке материала компанда, который больше предрасположен к дефектам, чем его дополнение из пластмассы [10]. С другой стороны, в условиях переменного тока напряжение разделяется приблизительно одинаково между пластмассой и компандом (рис. 4б).

Второй пример показывает распределение поля в системе изоляции экрана рентгеновской трубки. Раньше подобная задача была решена в [11]. Со значительным упрощением,

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи**

задача снова была смоделирована в осесимметричной аппроксимации с размером сетки приблизительно 20000 треугольников. Здесь имеются четыре заметно различных диэлектрических участка: вакуум внутри трубки, стеклянная оболочка, масло и пластмассовый барьер.

Моделировались два случая. Для анализа в стационарном состоянии полем управляют проводимости материалов. В описываемых далее моделях соотношение проводимости вакуума, стекла, масла и пластмассы было следующим:  $10^{-13}$ :  $10^{-14}$ :  $10^{-13}$ :  $10^{-12}$ :  $10^{-13}$ . Их относительные диэлектрические проницаемости были заданы как 1, 5,75, 2,25 и 3,5 соответственно. Отметим, что «проводимость» вакуума очень сильно зависит от напряженности поля и полярности [12]. В некоторых действующих рентгеновских трубках при возрастании напряженности поля на 5% темновые токи обычно возрастают на порядок [13].

Снова этот пример иллюстрирует поразительное различие в распределении полей постоянного и переменного (переходный процесс) тока. В первом случае масло в значительной степени не нагружено, с тенденцией еще более меньшей нагрузки в процессе старения. Пластмассовый барьер играет важную роль для изоляции, принимая главный удар прикладываемого напряжения. При переменном токе масло нагружено намного сильнее; в противоположность случаю постоянного тока, распределение поля будет оставаться практически не изменяющимся со временем.

Хотя в приведенных выше примерах как геометрия, так и физические свойства рассматриваются с большим упрощением, анализ поля полезен тем, что позволяет а) идентифицировать основное различие в работе при постоянном и переменном токе или в переходных условиях, и б) нахождение перегруженных участков. Опытный разработчик может хорошо справиться с первой частью без затрат времени на подробные модели, используя правильные граничные условия и эквивалентные схемы.

**IV. НЕЛИНЕЙНЫЕ АСПЕКТЫ**

Приняв существование распределения поля в зависимости от тока утечки, начинаем узнавать о более тонких нелинейных аспектах. Последнее представляет огромную важность при работе с постоянным током или квазипостоянным током. Классическим примером является кабель постоянного тока при токовой нагрузке. При имеющем высокую температуру внутреннем проводнике поле в экране становится сильнее — ситуация при линейной частоте невыносимая (см., например, [3], [14]).

В чрезвычайно неоднородных полях эффекты пространственного разряда, вызванного местной ионизацией в масле изоляции, эмиссией поля и т. п., значительно изменяют распределение поля. Эти явления не обязательно ограничиваются случаем частичных разрядов, возникающих в пустотах изоляции. Фактически, распределение «в стационарном состоянии» представляет неправильное наименование

для случая с высокими напряженностями под приложенным напряжением постоянного тока: пространственные и поверхностные заряды образуются и исчезают, осуществляя динамическое распределение поля. Подобные явления наблюдаются в движущейся среде, например в диэлектрических жидкостях при приложении неоднородного электрического поля. Даже при отсутствии ионизации полярные частицы циркулируют вследствие электроконвекции. Движущие силы, пропорциональные градиенту поля и дипольному моменту жидкости (или газа), весьма достаточны, чтобы обеспечивать эффективное смешивание и охлаждение в различной аппаратуре постоянного тока, например в источниках питания с масляной изоляцией. Пример «газового насоса», приводящего к исчезновению пламени, дан в [15]. По причине перемещения, горячие и холодные участки, имеющие различные проводимости (высокие и низкие соответственно), мигрируют, непрерывно изменяя распределение электрического поля. Такое поведение чрезвычайно трудно поддается количественному определению, особенно в ионизированных средах. Отметим, что хотя даже коммерческие пакеты имеют нелинейные решатели, позволяющие моделировать свойства материалов в функции поля и температуры, вычисления электрического поля постоянного тока в сложных структурах редко дают ценную количественную информацию. Исключением для этого утверждения являются случаи, когда диэлектрические свойства известны [16]. Однако мы полагаем, что даже качественное понимание является полезным инструментом для успешной разработки.

**V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Приведенное выше исследование показывает, что граничное условие (9) обеспечивает ясное физическое основание для типичных в области высокого напряжения задач, где следует учитывать неидеальность изоляции. И наоборот, граничное условие (4) вводит в заблуждение вследствие того, что не учитывает проводимость изоляции; его следует представлять как упрощение условия (9). Уравнение (6) учитывает ток проводимости, но не приносит никакой пользы в расчетах электрического поля в реальной изоляции.

Более сложные случаи, когда токи проводимости и смещения соизмеримы (для исследуемой в разделе II задачи это диапазон ниже герца), следует рассматривать более досконально. Также следует уделять внимание вопросам нелинейности. Отметим, что для простых систем изоляции, например в многослойном плоском, цилиндрическом или сферическом конденсаторе, с задачей легко справиться, используя эквивалентные R-C-цепи. Этот подход хорош для студентов-электриков.

**VI. БЛАГОДАРНОСТИ**

Автор выражает благодарность компании Spellman High Voltage Electronics Corporation за поддержку, сделавшую возможной публикацию этой работы.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАТЬИ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКЕ****Научные статьи****VII. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- [1] P. Gallagher, "High Voltage: Measurement, Testing and Design". Wiley, 1983, p. 197.
- [2] A.I. Dolginov, "High Voltage Engineering". Energia, Moscow, 1968.
- [3] M.S. Khalil, "International Research and Development Trends and Problems of HVDC Cables with Polymeric Insulation". IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 6, 1997, pp. 35-47.
- [4] E., Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, "High Voltage Engineering", 2nd Ed., Newnes, Oxford, 2000, par. 4.3.1 (see also editions 1970, 1984).
- [5] M.S. Naidu and V. Kamaraju, "High Voltage Engineering", 2nd Ed. McGraw Hill, NY, 1995.
- [6] G.A. Grinberg, "Selected Aspects of Mathematical Theory of Electrical and Magnetic Phenomena", Academy of Sciences of USSR, Moscow-Leningrad, 1948, Ch. 1.
- [7] M. Beuer et al., "Hochspannungstechnik", Springer-Verlag, 1986 (Ch. 3, 4), 1992.
- [8] K.J., Binns, P.J. Lawrenson and C.W. Trowbridge, "The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Field", Wiley, NY, 1992.
- [9] Maxwell<sup>®</sup> 2D Student Version, Ansoft Corp., Pittsburgh, 2002.
- [10] V. Okun, A. Pokryvailo, and V. Reznik, "Cascade Generator", Certificate of Invention 1198581, 1985, filing date 18 Apr 1984.
- [11] A. Pokryvailo, "Study of Electric Field in Shielded X-Ray Tubes", Instrumentation and Methods of X-Ray Analysis, Vol. 31, pp. 151-157, 1983.
- [12] "Handbook of Vacuum Arc Science and Technology". Ed. by Boxman R.L. et al. Noyes Publications, NJ, 1995.
- [13] A. Pokryvailo and V.L. Okun, "An Investigation of Stray Currents of X-Ray Tubes Having Tubular Hollow Anodes", Instrumentation and Methods of X-Ray Analysis, v. 32, pp. 120-126, 1984.
- [14] R.N. Hampton, "Some of the Considerations for Materials Operating Under High-Voltage, Direct-Current Stresses", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 24, No. 1, 2008, pp. 5-13.
- [15] E. Sher, A. Pokryvailo, E. Yacobson, and M. Mond, "Extinction of Flames in a Nonuniform Electric Field", Combust. Sci. and Tech., 1992, Vol. 87, pp. 59-67.
- [16] S. Qin and S. Boggs, "Design Considerations for High Voltage DC Components", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 28, No. 6, 2012, pp. 36-44.

**А****АНАЛИТИЧЕСКАЯ РЕНТГЕНОСКОПИЯ**

использование рентгеновской дифракции, флуоресценции и других рентгеновских методов для исследования состава и свойств материалов.

**ДУГОВАЯ ЛАМПА**

тип лампы с применением дугового разряда. Два электрода разделены газовой средой (аргон, криптон и т. п.), ионизируемой с помощью источника высокого напряжения, который создает непрерывный дуговой разряд, излучающий свет.

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ КОНТРОЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

специальные автоматические приборы для проверки интегральных схем, печатных плат и других электронных устройств.

**В****ПРОСВЕЧИВАНИЕ БАГАЖА**

использование рентгеновского анализа и других методов контроля для проверки коммерческого и личного багажа в целях обнаружения контрабанды.

**ДЕНСИТОМЕТРИЯ КОСТЕЙ**

применяемый в диагностике и лечении остеопороза медицинский рентгеновский метод определения количества костного вещества на квадратный сантиметр.

**СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ УСТРОЙСТВ**

автоматические системы обнаружения взрывчатых веществ при помощи различных аналитических методов досмотра багажа.

**С****ТЕСТИРОВАНИЕ КАБЕЛЕЙ**

метод проверки электрических соединений в кабеле или в сборочном узле при помощи тока и напряжения от источника питания.

**ЗАРЯДКА КОНДЕНСАТОРА**

с применением высоковольтного источника питания для зарядки конденсатора в устройствах импульсной энергетики.

**КАПИЛЛЯРНЫЙ ЭЛЕКТРОФОРЕЗ (СЕ)**

аналитический метод разделения и идентификации ионов в проводящей жидкой среде по их заряду, силам трения и массе.

**ДОСМОТР ГРУЗОВ**

проверка массового груза с использованием рентгеновского анализа и других методов в целях обнаружения контрабанды.

**ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ТОМОГРАФА**

специализированный высоковольтный источник питания, разрабатываемый по техническим условиям заказчика для питания мощных рентгеновских трубок, применяемых в аксиальной компьютерной томографии.

**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА**

электронный вакуумный прибор конической формы, в состав которого входит электронная пушка; применяется для отображения графической информации и движущихся изображений на флуоресцентном экране.

**КАНАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ**

электронный вакуумный прибор для увеличения общего заряда бомбардирующих частиц, позволяющий одному электрону вызывать каскадный эффект путем вторичной эмиссии.

**КАНАЛОТРОН**

коммерческое наименование специального типа электронного умножителя. Более подробно см. «Канальный электронный умножитель».

**ЛАМПА С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ**

тип лампы, создающей усиленную вторичную электронную эмиссию без нагрева катода (термоионная эмиссия).

**СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕР**

газовый лазер непрерывного излучения в диапазоне длин волн 9,4–10,6 мкм, активной средой которого является диоксид углерода.

**ГЕНЕРАТОР КОРОННОГО РАЗРЯДА**

устройство с высоковольтным источником питающего напряжения для ионизации воздуха с целью создания коронного разряда. Обычно используется для генерации озона, который применяется в различных технологиях промышленной очистки.

**ГЕНЕРАТОР ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ**

см. «Источник питания компьютерного томографа»

**Д****ИСПЫТАНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ**

процесс подачи высокого напряжения на кабель или устройство с целью определения значения напряжения, при котором происходит пробой изоляции.

**ЦИФРОВОЙ ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

устройство, формирующее рентгеновское изображение без использования традиционной рентгеновской фотопленки, исключая необходимость ее проявления.

**Е****ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ЛИТОГРАФИЯ**

технология нанесения структурного рисунка сканирующим электронным лучом, применяется при производстве полупроводниковых интегральных схем.

**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА**

процесс сплавления, при котором кинетическая энергия электронов при их соударении с двумя металлическими поверхностями переходит в тепловую и плавит материалы.

**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ НАПЫЛЕНИЕ**

процесс нанесения тонкого слоя материала (проводника или диэлектрика), расплавленного электронным лучом и приведенного в газообразное состояние, на поверхность внутри вакуумной камеры.

**ЭЛЕКТРООПТИКА**

область науки, изучающая воздействие прикладываемого электрического поля на оптические свойства материалов.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП**

прибор, использующий электронный луч для получения увеличенного изображения образца. В отличие от оптического микроскопа, где возможность увеличения ограничивается длиной волны света, электронный микроскоп позволяет добиться увеличения в миллион раз.

**ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ  
ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

технология количественного определения элементного состава вещества, эмпирической формулы, химического и электронного состояния его составляющих.

**ЭЛЕКТРОФОРЕЗ**

перемещение частиц дисперсной фазы относительно жидкости под воздействием однородного электрического поля.

**ЭЛЕКТРОПОРАЦИЯ**

явление значительного увеличения электропроводимости и проницаемости клеточных цитоплазматических мембран под воздействием внешнего электрического поля.

**ЭЛЕКТРОПРЯДЕНИЕ**

создание наноразмерных волокон из электрически заряженной жидкости. Возможно использование сложных молекул, что делает электропрядение пригодным для биотехнологических применений.

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ДЕРЖАТЕЛЬ**

применяемый в производстве полупроводников фиксатор рабочей поверхности, в котором электростатические силы используются для удерживания кремниевой пластины в процессе обработки.

**ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА**

использование высоковольтного источника питания вместе с другим оборудованием для моделирования процессов накопления и разряда статического электричества в электронных приборах.

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ НАНЕСЕНИЕ  
РИСУНКА (ФЛОКИНГ)**

нанесение малых частиц или волокон на клейкую поверхность с использованием электростатических сил. Типичный флок состоит из коротко срезанных разноцветных натуральных или синтетических волокон.

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ЛИНЗЫ**

устройство фокусировки пучка заряженных частиц электростатическим полем.

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ПРОМАСЛИВАЮЩАЯ МАШИНА**

промышленное устройство, в котором электростатические силы используются для точного нанесения масла на требующие поверхности.

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ**

системы сбора частиц, в которых удаление частиц из прокачиваемого газа осуществляется с использованием принципов электростатического притяжения.

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ПЕЧАТЬ**

процесс печати или копирования, в котором электростатические силы используются для создания изображения с помощью порошка или чернил наносимых непосредственно на предназначенную для печати поверхность.

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ СЕПАРАТОР**

устройство для отделения и сортировки разнородных материалов из общего потока под воздействием электростатических сил. Применяется в добывающей промышленности и в утилизации отходов.

**ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗАТОР**

устройство, в котором рентгеновская флуоресценция используется для определения состава сырья с целью контроля качества в различных производственных процессах.

**ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ  
ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ**

спектроскопический элементный анализ вещества на основе исследования рентгеновского излучения материала, подвергнутого воздействию заряженных частиц.

**СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

см. «Системы обнаружения взрывных устройств».

## F

**ИМПУЛЬСНАЯ ЛАМПА**

электрическая лампа тлеющего разряда, производящая очень короткие и очень интенсивные вспышки белого света с непрерывным спектром.

**АВИАЦИОННЫЙ ТРЕНАЖЕР**

сложная электромеханическая система, моделирующая управление летательным аппаратом для тренировки. Специальные электронно-лучевые прожекторы часто используются для перекрытия широкоэкранных устройств отображения с целью создания реалистического зрительного представления.

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ МАСКИ  
СФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ЛУЧОМ**

Оптические маски для проекционной литографии используются при обработке полупроводниковых материалов в качестве устройств для формирования структур на подложках интегральных микросхем. Дефекты маски можно устранять с помощью специального оборудования, в котором используется очень тонко фокусируемый пучок ионов.

**КОНТРОЛЬ УРОВНЯ ЗАПОЛНЕНИЯ**

автоматическая система проверки уровня заполнения контейнеров с применением рентгеновского излучения. Обычно используется в пищевой промышленности.

**КОНТРОЛЬ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

применение методов рентгеноскопии для проверки продуктов промышленной переработки с целью обнаружения фрагментов костей и посторонних примесей.

**G****ГАММА-КАМЕРА**

устройство для отображения гамма-излучения радиоизотопных источников; метод, известный как сцинтиграфия.

**ДЕТЕКТОР ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

устройство, принцип работы которого основан на взаимодействии гамма-лучей и материала сцинтиллятора. При таком взаимодействии излучается слабый свет, который фокусируется и усиливается фотоумножителем.

**ГЕЛЬ-ЭЛЕКТРОФОРЕЗ**

метод разделения дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), рибонуклеиновой кислоты (РНК) или молекул белка посредством воздействия электрического поля на гелевую матрицу.

**H****ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ**

устройство, в котором цепочка прецизионных высоковольтных резисторов заканчивается нижним масштабирующим резистором, обеспечивающим пропорциональный низковольтный сигнал, который можно легко измерить.

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

безопасная методика точного измерения высоковольтных сигналов с использованием высоковольтных делителей напряжения, измерительных приборов с высоким импедансом и соответствующего оборудования для подавления коронного разряда.

**КОМПОНОВКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТРОЙСТВ**

методика разработки промышленных высоковольтных устройств с учетом всех влияющих факторов, например, подавление коронного разряда, требования к изоляции, пробой и повреждение изоляции, совместимость материалов.

**ИСПЫТАНИЕ ВЫСОКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ**

процесс приложения испытательного напряжения к кабелю или сборочному узлу для подтверждения способности образца выдерживать определенный уровень напряжения в течение заданного времени.

**ЛАМПА С ПОЛЫМ КАТОДОМ**

специальная оптическая лампа, применяемая для настройки номинальной средней длины волны спектра излучения линейных источников света, например лазеров.

**I****МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ**

вид масс-спектрометрии, позволяющий выявлять ряд металлов и неметаллов в очень малых концентрациях. Метод основан на использовании индуктивно-связанной плазмы в качестве источника ионов и масс-спектрометра в качестве детектора.

**ИОННЫЙ ЛУЧ**

пучок заряженных частиц – ионов.

**ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ**

применяемый в производстве полупроводников процесс, при котором частицы требуемого вещества внедряются в твердый материал посредством пучка ионов высокой энергии, тем самым изменяя физические свойства материала мишени.

**ИОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ**

процесс, при котором газы низкого давления ионизируются, ускоряются и нейтрализуются под воздействием высокого напряжения, создающего нейтральный пучок атомов, бомбардирующих образцы и удаляющих вещество посредством кинетических или химических процессов.

**ИСТОЧНИК ИОНОВ**

электромагнитное устройство для создания заряженных частиц.

**ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА**

простейший из газонаполненных детекторов для обнаружения и измерения ионизирующего излучения.

**УСИЛИТЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

вакуумные приборы для повышения интенсивности света в оптических системах; флуоресцентные материалы, чувствительные к рентгеновскому или гамма-излучению; или устройства для преобразования невидимого излучения в свет видимого участка спектра.

**ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ**

электронное устройство для генерации очень коротких импульсов высокого напряжения или тока путем разряда конденсаторов в последовательном, параллельном или последовательно-параллельном соединении для импульсного испытания.

**ПРОМЫШЛЕННАЯ ЦВЕТНАЯ ПЕЧАТЬ**

См. «Электростатическая печать».

**ПРОМЫШЛЕННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ**

применяемый в промышленности процесс контроля с использованием компьютерной аксиальной томографии.

**ПРОМЫШЛЕННЫЙ МАГНЕТРОН**

устройство, применяемое в больших установках микроволнового нагрева для приготовления пищи в промышленных масштабах, просушки порошка или вулканизации резины.

## ТЕМАТИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

## L

**НАЗЕМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

сложный, надежный источник питания с резервированием, специально разработанный и изготовленный для питания подводных кабелей телекоммуникационных волоконно-оптических линий.

**ЛАЗЕР**

источник интенсивного сфокусированного когерентного излучения.

**ДЕТЕКТОР УТЕЧКИ**

устройство на основе масс-спектрометра, применяемого для обнаружения определенных газов в очень малой концентрации.

## M

**КАМНЕДРОБЛЕНИЕ**

медицинская процедура с использованием ударных волн для дробления камней в почках, мочевом пузыре, или уретре.

**МАГНЕТРОН**

вакуумная трубка высокой мощности, в которой поток электронов в магнитном поле ускоряется в объемном резонаторе для генерации излучения высокой частоты.

**МАММОГРАФИЯ**

медицинская процедура диагностики рака груди с помощью рентгеновского излучения.

**ГЕНЕРАТОР МАРКСА**

разновидность импульсного генератора. См. «Импульсные генераторы».

**МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ С ЛАЗЕРНОЙ ДЕСОРБЦИЕЙ-ИОНИЗАЦИЕЙ В ПРИСУТСТВИИ МАТРИЦЫ**

метод специальной масс-спектрометрии, применяемый для анализа бимолекулярных и больших органических молекул, которые при ионизации обычными методами разрушаются.

**ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ С ЛАЗЕРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ И ДЕСОРБЦИЕЙ ИЗ ЖИДКОЙ МАТРИЦЫ**

см. «Масс-спектрометрия с лазерной десорбцией-ионизацией в присутствии матрицы».

**ТЕРАПИЯ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ОПУХОЛЕЙ**

использование ионизирующего излучения для лечения злокачественных опухолей.

**ТЕРАПЕВТИЧЕСКОЕ ОБЛУЧЕНИЕ**

см. «Терапия злокачественных опухолей»

**МЕДИЦИНСКАЯ СТЕРИЛИЗАЦИЯ**

использование гамма-излучения для дезинфекции медицинских инструментов и средств, таких как имплантанты, диагностические комплекты, катетеры и инфузионные системы.

**ДЕТЕКТОРЫ НА МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИНАХ**

детектор электронов, ионов, ультрафиолетового и рентгеновского излучений. Аналогично электронному умножителю, принцип действия основан на вторичной эмиссии.

**МИКРОВОЛНОВЫЙ ГЕНЕРАТОР**

см. «Магнетрон»

**MONOBLOCK®**

зарегистрированная торговая марка компании Spellman для серии выпускаемых «под ключ» источников рентгеновского излучения с высоковольтными источниками питания, системой обеспечения энергии накала, электроникой управления и рентгеновской трубкой, конструктивно оформленными в единый простой и недорогой узел; находят различное применение в медицине, промышленности и в системах безопасности.

## N

**ГЕНЕРАТОР НЕЙТРОНОВ**

устройство, содержащее компактные линейные ускорители и генерирующее нейтроны путем объединения изотопов водорода.

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ (НРК)**

методы, используемые для исследований предметов, материалов или систем без нарушения их пригодности к дальнейшему использованию. Обычно используются в немедицинских исследованиях физической целостности.

**НЕТЕРМИЧЕСКИЙ ПЛАЗМЕННЫЙ РЕАКТОР**

устройство, вырабатывающее частично ионизированный газ при низкой температуре и атмосферном давлении для плазменно-химического осаждения из газовой фазы, плазменно-травления и плазменной очистки.

**МЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЛОГИЯ**

область медицины и диагностической визуализации, применяющая радиоактивные изотопы и процесс радиоактивного распада для диагностики и лечения заболеваний.

**МОДУЛИ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

стандарт, определяющий механические и электрические технические характеристики для электронных модулей, применяемых в экспериментальной ядерной физике.

## O

**ГЕНЕРАТОР ОЗОНА**

См. «Генератор коронного разряда».

## P

**ФОТОЛИТОГРАФИЯ**

процесс перенесения геометрической формы маски на кремниевую пластину, обычно используется при производстве интегральных схем.

**ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ**

вакуумное устройство, являющееся высокочувствительным детектором света в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

**ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ**

немагнитный прибор, преобразующий электрический потенциал в механическое усилие и наоборот. Усиление по напряжению является функцией коэффициента расширения материала, числа слоев, толщины и общей длины материала.



**ПЛАЗМЕННЫЙ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЬ**

устройство, пропускающее сжатый газ через тонкий канал с заряженным электродом. При подаче высокого напряжения создается мощный искровой разряд, нагревающий газ до тех пор, пока не возникнет плазменный факел.

**ПЛАЗМЕННЫЙ ФАКЕЛ**

см. «Плазменный воспламенитель»

**ЯЧЕЙКА ПОККЕЛЬСА**

управляемое напряжением оптическое устройство, которое изменяет поляризацию проходящего через него света.

**ПОЗИТРОН-ЭМИССИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ (ПЭТ)**

способ визуализации в медицинской радиологии, позволяющий получить трехмерное изображение функционального процесса в организме. Система регистрирует гамма-лучи, испускаемые позитронно-активным радионуклидом, введенным в организм на биологически активной молекуле.

**ОБОРУДОВАНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ**

расположенные на судне или на берегу высоковольтные источники питания для волоконно-оптических линий связи. См. «Наземное оборудование обеспечения энергоснабжения для телекоммуникаций».

**КОНТРОЛЬ ПРОДУКЦИИ**

использующие рентгеновское излучение системы проверки наличия в продукции посторонних примесей, например металлов, стекла, камней и костей. Более подробно см. «Контроль в пищевой промышленности».

**ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ СЧЕТЧИК**

детектор для измерения альфа-, бета- и рентгеновского излучения, состоящий из пропорциональной счетной трубки и связанных электрических цепей. Аналогичен счетчику Гейгера-Мюллера, но с другим газом и меньшим напряжением трубки.

**ЦЕПИ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ**

накапливают электрическую энергию за продолжительный интервал времени и затем отдают запасенную энергию в виде непродолжительного импульса для различных применений в импульсной энергетике. Цепь формирования импульсов обычно заряжается от высоковольтного источника питания и затем быстро разряжается в нагрузку через высоковольтный переключатель.

**ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ**

электрическая цепь или часть электронного оборудования, используемая для генерации импульсов с изменяемыми амплитудой, коэффициентом заполнения и частотой.

**ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ**

источник питания, для которого свойственна выработка импульсов на выходе.

**Q****КВАДРУПОЛЬНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР**

прибор, состоящий из четырех заряженных стержней, расположенных параллельно траектории движения регистрируемых ионов. Ионы фильтруются и сортируются по отношению массы к заряду посредством изменения напряжения в стержнях.

**S****РАСТРОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОСКОПЫ (РЭМ)**

См. «Электронные микроскопы».

**СУДОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

сложный, высоконадежный источник питания с резервированием, специально разработанный и изготовленный для питания подводных кабелей телекоммуникационных волоконно-оптических линий во время их укладки или ремонта на борту судна-кабелеукладчика.

**КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКАЯ СМОЛА**

твердый изолирующий материал, часто применяемый в высоковольтных источниках питания; при компактном размере и высокой плотности мощности обеспечивает изоляцию от внешней среды.

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ ЕДИНОЙ ФОТОЭМИССИИ**

аналогичный позитрон-эмиссионной томографии метод медицинской рентгенографии, при котором в организм вводится позитрон-активный радионуклид. Этот метод применяется при диагностике многих заболеваний, включая болезни сердца, рак, поражение мозга.

**СПЕКТРОМЕТР**

прибор для измерения параметров света в определенной области спектра, обычно используется в спектральном анализе для спектральной идентификации веществ.

**СПЕКТРОФОТОМЕТР**

прибор, измеряющий интенсивность света в функции цвета (точнее, длины волны).

**НАПЫЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ**

процесс физического осаждения из паровой фазы для получения тонкой пленки на поверхности подложки, применяемый в производстве и научных исследованиях. Напыление происходит, когда молекулы ионизированного газа вытесняют атомы мишени. Эти атомы связываются с подложкой на атомарном уровне, образуя тонкую пленку.

**СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕЩЕСТВ**

приборы для распознавания неизвестных веществ (наркотиков, взрывчатки и т. п.) с использованием различных аналитических методов, в том числе рентгено- и масс-спектропии.

**T****ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ**

использование аналитических методов рентгеновской флуоресценции для определения толщины металлизированных, лакокрасочных или других видов покрытий на металле основания.

**ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ**

метод, в котором ускоряемым электрическим полем неизвестным ионам сообщается одинаковая кинетическая энергия для пролета определенного расстояния в вакуумной трубке. Скорость (и, соответственно, время пролета) ионов зависит от отношения их массы к заряду. Идентификация неизвестных веществ осуществляется путем сравнения времени пролета с известными эталонами.

**СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СЛЕДОВ ВЕЩЕСТВ**

системы для обнаружения контрабандных наркотиков, взрывчатых веществ методами рентгеноскопии, масс-спектрометрии и др.

**ПРОСВЕЧИВАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП**

тип электронного микроскопа, в котором прошедшие сквозь образец электроны используются для создания изображения образца. Более подробно см. «Электронные микроскопы».

**U****ИМПУЛЬСНАЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ЛАМПА**

устройство, состоящее из четырех основных частей: высоковольтного источника питания, схемы формирования импульсов, ксеноновой импульсной лампы и пусковой цепи. Ультрафиолетовый свет используется для сушки чернил, клеев, покрытий и других производственных целей.

**СИСТЕМА УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ**

система, в которой источники ультрафиолетового света используются в устройствах стерилизации воды для уничтожения бактерий и вирусов.

**V****УСТАНОВКА ТЕРМОВАКУУМНОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК**

устройство, которое используется для последовательного осаждения отдельных атомных или молекулярных слоев на твердую поверхность путем термического испарения в вакууме, напыления, вакуумно-дугового испарения, лазерной абляции или химического осаждения из паровой фазы.

**ИОННЫЙ ВАКУУМНЫЙ НАСОС**

прибор, ионизирующий газы сильным электрическим полем и ускоряющий созданные ионы на твердый электрод для эффективного удаления их из вакуумной камеры.

**W****ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ**

метод количественного определения рентгеновского излучения заданной длины волны, рассеянного кристаллом. Обычно применяется для химического анализа в рентгеновских флуоресцентных спектрометрах.

**КАРОТАЖ**

непрерывное измерение параметров разреза нефтяной или газовой скважины с помощью специального геофизического оборудования с электрическим питанием; применяется для принятия решений о выполнении операций бурения и добычи.

**X****РЕНТГЕНОВСКИЙ АНАЛИЗ**

применение различных методов рентгенографии в целях определения свойств известных или неизвестных веществ.

**РЕНТГЕНОВСКАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЯ**

изучение кристаллических структур методами рентгеновской дифракции. Вызываемое кристаллической решеткой рассеивание рентгеновского луча характеризует строение атомной кристаллической решетки.

**РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИФРАКЦИЯ**

метод получения информации о структуре кристаллического твердого тела, используется в биохимии для трехмерных структур сложных биомолекул.

**РЕНТГЕНОВСКАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ**

процесс рентгеновского облучения исследуемого образца и испускания им вторичного рентгеновского излучения в результате возбуждения электронных оболочек. Это вторичное излучение анализируется для идентификации материала.

**РЕНТГЕНОВСКИЙ ГЕНЕРАТОР**

устройство, излучающее рентгеновские волны. В производстве источников питания термин рентгеновский генератор часто обозначает специальный источник высокого напряжения, питающий рентгеновскую трубку.

**РЕНТГЕНОДЕФЕКТΟΣКОПИЯ**

использование рентгеновского излучения в промышленности для контроля качества материалов.

**РЕНТГЕНОЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ**

процесс облучения образца и измерения потока вторичных электронов для определения свойств материала.

**РЕНТГЕНОВСКАЯ ПОРОШКОВАЯ ДИФРАКТОМЕТРИЯ**

аналитический метод с использованием рентгеновского излучения для определения свойств порошка или микрокристаллов неизвестного вещества.

**ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

электронный сборочный узел, содержащий все необходимые для генерации излучения компоненты (высоковольтный источник питания, систему обеспечения энергии накала, рентгеновскую трубку, управляющую электронику и пр.). Изделия серии Monoblock<sup>®</sup> фирмы Spellman являются источниками рентгеновского излучения.

## A

**ABSOLUTE ACCURACY (АБСОЛЮТНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ)**

Отклонение измеренного значения от его истинной или абсолютной величины.

**АС (ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК)**

В тексте прописные буквы: ас. Abbreviation for Alternating Current.

**AC BROWNOUT (СПАД НАПРЯЖЕНИЯ)**

Снижение напряжения ниже установленной величины.

**AC LINE (ЛИНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА)**

Проводная линия, обеспечивающая передачу напряжения переменного тока между двумя точками.

**AC LINE FILTER (ФИЛЬТР СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА)**

Схема фильтрации, размещенная на линии переменного тока для сглаживания колебаний с частотой выше, чем частота питающей сети.

**ALTERNATING CURRENT (ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК)**

Периодический ток с нулевым средним значением за период. Как правило, это ток, повторяющийся через равные промежутки времени и принимающий попеременно положительное и отрицательное значение.

**AMBIENT TEMPERATURE (ОКРУЖАЮЩАЯ ТЕМПЕРАТУРА)**

Средняя температура среды, непосредственно примыкающей к источнику питания. В случае принудительного воздушного охлаждения окружающая температура измеряется на входе воздуха. См. также OPERATING TEMPERATURE, STORAGE TEMPERATURE, TEMPERATURE COEFFICIENT.

**AMPERE (АМПЕР [А])**

Поток заряда в данной точке цепи, равный одному кулону в секунду.

**AMPLIFIER (УСИЛИТЕЛЬ)**

Электрическая схема или элемент, обеспечивающий усиление.

**AMPLIFIER, DC (УСИЛИТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА)**

Усилитель с гальванической связью, обеспечивающий усиление сигналов нулевой частоты.

**AMPLIFIER, DIFFERENTIAL (УСИЛИТЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ)**

Усилитель с двумя входами (прямым и инверсным), обеспечивающий усиление разности сигналов, подаваемых на эти входы.

**AMPLIFIER, INVERTING (УСИЛИТЕЛЬ ИНВЕРТИРУЮЩИЙ)**

Усилитель, у которого фазы выходного и входного сигналов противоположны. Может использоваться для построения отрицательной обратной связи в целях стабилизации.

**AMPLIFIER, NONINVERTING (УСИЛИТЕЛЬ НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ)**

Усилитель, у которого фазы входного и выходного сигналов совпадают.

**AMPLIFIER, OPERATIONAL (УСИЛИТЕЛЬ ОПЕРАЦИОННЫЙ)**

Усилитель постоянного тока, у которого коэффициент усиления настолько велик, что его характеристики определяются практически только параметрами элементов на входе и в цепи обратной связи. Операционные усилители широко используются в обработке сигналов и вычислительных процедурах.

**ANODE (АНОД)**

1) (в электровакуумных приборах) Электрод, через который основной поток электронов отводится из межэлектродного пространства. 2) (в полупроводниковых выпрямительных диодах) Электрод, с которого ток вытекает в прямом направлении (стандарт IEEE Std 100-1988).

**ANSI**

Американский национальный институт стандартов.

**APPARENT POWER (КАЖУЩАЯСЯ [ПОЛНАЯ] МОЩНОСТЬ)**

Мощность в цепи переменного тока, равная произведению тока на напряжение.

**ARC (ДУГА)**

Электрический разряд в газе. Обычно характеризуется падением напряжения вблизи катода, примерно равным ионизационному потенциалу газа. Стандарт IEE Std 100-1988.

**ASYMMETRICAL WAVEFORM (АСИММЕТРИЧНЫЙ СИГНАЛ)**

Напряжение или ток, у которого форма сигнала по обе стороны горизонтальной оси неодинакова.

**ATTENUATION (ОСЛАБЛЕНИЕ)**

Уменьшение амплитуды или мощности сигнала.

**AUTHORIZED PERSON (УПОЛНОМОЧЕННОЕ ЛИЦО)**

Квалифицированный специалист, который в силу своих обязанностей или служебного положения может обращаться с электрооборудованием, или же лицо, предупрежденное о возможной опасности, которому даны инструкции к соответствующим действиям другим лицом, имеющим на это полномочия.

**AUTO TRANSFORMER (АВТОТРАНСФОРМАТОР)**

Трансформатор с одной обмоткой, имеющей один или несколько отводов.

**AUTOMATIC CROSSOVER (АВТОМАТИЧЕСКАЯ СМЕНА РЕЖИМА)**

Характеристика источника питания, имеющего возможность автоматического переключения режима работы в зависимости от нагрузки или настройки со стабилизации напряжения на стабилизацию тока. Данное понятие применимо к устройствам, у которых показатели стабилизации по току и напряжению практически одинаковы. Термин неприменим для ограничивающих стабилизаторов тока или напряжения. См. также CROSSOVER POINT.

**AUTOMATIC GAIN CONTROL (AGC) (АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ [АРУ])**

Процедура или средство автоматической регулировки усиления по заданному алгоритму как функции входного или другого параметра.

**AUXILIARY SUPPLY (ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК)**

Источник питания для подачи мощности помимо нагрузки в иные узлы устройства в целях их надлежащего функционирования (Стандарт IEEE Std 100-1988).

**AWG**

Американская система оценки проводов (стандарты на диаметр проводов).

**В****BANDWIDTH (ПОЛОСА ЧАСТОТ)**

Понятие базируется на представлении источника питания в виде усилителя, рабочая полоса которого ограничена частотой, на которой усиление падает на 3 дБ.

Полоса частот является важнейшим фактором, определяющим переходные процессы и выходной импеданс.

**BASEPLATE TEMPERATURE (ТЕМПЕРАТУРА МОНТАЖНОЙ ПЛАТЫ)**

Температура в наиболее горячей точке монтажной платы источника питания.

**BEAD (ШАЙБА [ФЕРРИТОВАЯ])**

Небольшой феррит, используемый в качестве высокочастотного индуктивного сердечника.

**BEAM SUPPLY (ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА)**

Источник питания ускоряющих систем электронных и ионных пучков.

**BENCH POWER SUPPLY (СТЕНДОВЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ)**

Источник питания с органами управления выхода, измерителями, клеммами и индикаторами, предназначенный для установки на рабочую поверхность экспериментальных лабораторных стендов.

**BIAS SUPPLY (ИСТОЧНИК СМЕЩЕНИЯ)**

Источник, предназначенный для подачи напряжения на электрод или решетку <прерывателя> Венельта. Данное напряжение управляет величиной тока, который отбирает нагрузка от источника питания. Смещение «отслеживает» выходные параметры пучка в электронно-лучевых устройствах (компания Bertan High Voltage).

**BIFILAR WINDING (БИФИЛЯРНАЯ НАМОТКА)**

Параллельная намотка двух проводников.

**BIPOLAR (БИПОЛЯРНЫЙ)**

Имеющий два/две полюса/полярности или направления.

**BIPOLAR PLATE (БИПОЛЯРНАЯ ПЛАСТИНА)**

Конструкция из электродов, в которой материалы с положительными и отрицательными свойствами расположены на противоположных сторонах проводящей пластины.

**BIPOLAR POWER SUPPLY (БИПОЛЯРНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ)**

Источник питания, реагирующий на направление и величину управляющих сигналов, и обеспечивающий выход положительной или отрицательной полярности с линейным переходом через нуль.

**BIT (БИТ)**

Двоичная единица информации, принимающая значения «0» или «1». См. также Byte.

**BLACK BOX (ЧЕРНЫЙ ЯЩИК)**

Элемент системы, определяемый своей функцией или рабочими параметрами.

**BLEED (УТЕЧКА)**

Небольшой ток утечки источника.

**BLEEDER RESISTOR (РЕЗИСТОР ТОКА УТЕЧКИ)**

Резистор, обеспечивающий разряд фильтрующих конденсаторов малым током утечки или стабилизацию выходного параметра.

**BOBBIN (БОБИНА)**

1. Тело из непроводящего материала, предназначенное для размещения на нем обмотки.

2. Цилиндрический электрод (обычно положительный), спрессованный из смеси активного материала, проводящего материала (напр., углеродная сажа), электролита и (или) связующего материала с центральным проводящим электродом, или другое устройство, которое используется в качестве токоприемника.

**BODE PLOT (ГРАФИК БОДЕ)**

График усиления контура регулирования в функции частоты. Обычно сопровождается вторым графиком зависимости фазы от частоты.

**BOOST REGULATOR (ИМПУЛЬСНЫЙ РЕГУЛЯТОР)**

Одно из устройств базового семейства ключевых источников питания. Принцип действия: энергия запасается в индуктивности во время импульса и отдается в паузе между импульсами.

**BREAKDOWN VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ ПРОБОЯ)**

1. Напряжение, вызывающее пробой изоляции.  
2. Обратное напряжение, при котором изменяются проводящие свойства полупроводникового прибора.

**BRIDGE CIRCUIT (МОСТОВАЯ ЦЕПЬ)**

Цепь с последовательно-параллельным включением элементов.

**BRIDGE CONVERTER (МОСТОВОЙ КОНВЕРТЕР)**

Цепь преобразования мощности с мостовым включением элементов.

**BRIDGE RECTIFIER (МОСТОВОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ)**

Двухполупериодный выпрямитель, включающий не менее двух мостов.

**BROWNOUT (ОГРАНИЧЕНИЕ НАГРУЗКИ)**

Преднамеренное снижение сетевого напряжения (10–15 %), предпринимаемое электрокомпанией в период пикового расхода в целях ограничения чрезмерного потребления.

**BUCK REGULATOR (КОМПЕНСИРУЮЩИЙ РЕГУЛЯТОР)**

Схема коммутации, при которой результирующее выходное напряжение ниже входного. Управление импульсным регулятором задействует индуктор, транзистор и диод для контроля энергии индуктора.

Управление транзистором позволяет чередовать подключение индуктора к источнику напряжения для сохранения энергии в индукторе и разрядом индуктора на нагрузку.

**BUFFER (БУФЕР)**

Промежуточная схема, изолирующая задающую цепь от влияния управляемой цепи (стандарт IEEE Std 100-1988).

**BUFFER (БУФЕР)**

Конденсатор для хранения электроэнергии на передней панели стабилизатора.

**BULK CAPACITOR (НАКОПИТЕЛЬНЫЙ КОНДЕНСАТОР)**

Накопительный конденсатор на переднем конце регулятора.

**BURN IN (ИСПЫТАНИЕ НА ОТКАЗ)**

Предэксплуатационные испытания изделия или системы в целях доработки, выявления дефектов, в том числе начального периода эксплуатации.

**BUS (ШИНА)**

Общий проводник для подачи мощности от источника на две или несколько цепей.

**BYTE (БАЙТ)**

Последовательность двоичных цифр, состоящая, как правило, из 8 бит, и используемая в качестве единицы обмена. См. также BIT.

## С

**CAPACITANCE (ЕМКОСТЬ)**

Свойство электрической цепи или устройства препятствовать изменению заряда. Свойство цепи, благодаря которому энергия может запасаться в электростатическом поле.

**CAPACITANCE-DISTRIBUTED (ЕМКОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ)**

Емкость цепи, обусловленная соседними витками катушек, параллельными выводами и соединениями.

**CAPACITIVE COUPLING (ЕМКОСТНАЯ СВЯЗЬ)**

Связь вследствие емкостного влияния между элементами цепи.

**CAPACITANCE, DISTRIBUTED (РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЕМКОСТЬ)**

Ток между разделенными проводящими металлическими деталями; зависит от напряжения и частоты.

**CAPACITOR (КОНДЕНСАТОР)**

Устройство хранения заряда. Простейший конденсатор состоит из двух проводников, разделенных диэлектриком.

**CAPACITOR INPUT FILTER****(ФИЛЬТР С ЕМКОСТНЫМ ВХОДОМ)**

Фильтр, в котором на входе установлен конденсатор.

**CATHODE (КАТОД)**

1. (в электровакуумных приборах) Электрод, через который первичный поток электронов попадает в межэлектродное пространство. 2. (в полупроводниках) Электрод, к которому направлен ток в цепи (стандарт IEEE Std 100-1988).

**CATHODE RAY TUBE (CRT)****(ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА [ЭЛТ])**

Визуализирующее устройство, в котором с помощью управляемого электронного луча на люминесцентном экране отображается буквенно-цифровая или графическая информация (стандарт IEEE Std 100-1988).

**CATHODE-RAY TUBE****(ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА [ЭЛТ])**

Устройство, в котором электронный луч фокусируется в небольшое пятно на люминесцентном экране, которое, изменяя положение и интенсивность, формирует видимое изображение. (стандарт IEEE Std 100-1988).

**CENTER TAP (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ОТВОД)**

Подключение, выполненное к центру электронного устройства.

**CGS UNIT (Система CGS)**

Система сантиметр-грамм-секунда.

**CHARGE (ЗАРЯД)**

1. Заряд: способ преобразования электрической энергии от источника стороннего тока в химическую энергию электролитической ячейки или батареи. 2. Потенциальная энергия, запасаемая в емкостном устройстве.

**CHASSIS (ШАССИ)**

Конструкция для придания жесткости источнику питания или для его защиты.

**CHASSIS GROUND (КОРПУСНАЯ ЗЕМЛЯ)**

Величина потенциала шасси.

**CHOKER COIL (КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ)**

Индуктор.

**CHOKER, RF (ИНДУКТИВНОСТЬ РАДИОЧАСТОТНАЯ)**

Катушка индуктивности с большим импедансом на высоких частотах.

**CIRCUIT INPUT FILTER (ВХОДНОЙ ФИЛЬТР)**

Фильтр, на входе которого имеется индуктивность (L) или индуктивность с емкостью (L/C).

**CIRCULAR MIL (КРУГОВОЙ МИЛ)**

Площадь сечения проводника диаметром в 0,001 дюйма.

**CIRCULATING CURRENT (БЛУЖДАЮЩИЙ ТОК)**

См. GROUND LOOP.

**CLAMP DIODE (ФИКСИРУЮЩИЙ [ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫЙ] ДИОД)**

Диод в ограничивающей или фиксирующей цепи.

**CLIPPER CIRCUIT (ОГРАНИЧИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ)**

Схема, блокирующая или срезающая часть сигнала при превышении заданного порога.

**CLOSED LOOP CONTROL (ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ)**

Тип автоматического управления, при котором для управления используются сигналы обратной связи от управляемого устройства или системы (стандарт IEEE Std 100-1988).

**CLOSED LOOP CONTROL SYSTEM (СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ)**

Система управления, в которой управляющий сигнал измеряется и сравнивается со стандартным значением, характеризующим желаемые параметры работы.

Примечание: всякое отклонение от стандартного обрабатывается управляющей системой в направлении уменьшения этого отклонения (стандарт IEEE Std 100-1988).

**COLLECTOR (КОЛЛЕКТОР)**

1. Устройство для электрического соединения между электрохимической ячейкой и внешней цепью. 2. В транзисторах: полупроводниковый электрод, на котором собираются основные носители.

**COMMON SHOCK (ОБЩИЙ СЕРДЕЧНИК)**

см. INTEGRATED MAGNETICS.

**COMMON-MODE NOISE (СИНФАЗНАЯ ПОМЕХА)**

Напряжение помехи, которое появляется на всех проводниках в одинаковой фазе относительно общего провода.

**COMMON-MODE OUTPUT (ВЫВОД СИНФАЗНОГО РЕЖИМА)**

Электрический вывод, подсоединенный к импедансу между клеммами незаземленного плавающего вывода источника питания, усилителя или сетевого устройства и точкой, на которую заземлен источник питания.

**COMMON POINT (ОБЩАЯ ТОЧКА)**

В управляемых источниках питания: один из выходных/входных выводов считается общим, к которому возвращаются все сигналы — нагрузки, опорные и внешнего управления.

**COMMON RETURN (ОБЩИЙ ПРОВОД)**

Общий проводник двух и более цепей.

**COMPARISON AMPLIFIER (УСИЛИТЕЛЬ-КОМПАРАТОР)**

Усилитель постоянного тока, сравнивающий сигнал с опорным значением и усиливающий разность с целью ее подачи на управляющие элементы источника питания.

**COMPENSATION (КОМПЕНСАЦИЯ)**

Введение в схему элементов в целях стабилизации управляющего контура.

**COMPLIMENTARY TRACKING (КОМПЛИМЕНТАРНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ)**

Система взаимосвязи двух стабилизаторов напряжения, при которой один (ведомый) работает под управлением другого (ведущего).

**COMPLIANCE (ЗАКЛЮЧЕНИЕ О СООТВЕТСТВИИ)**

Сертификат соответствия изделия стандартам, выданный уполномоченным ведомством. См. также SAFETY COMPLIANCE.

**COMPLIANCE VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ)**

Выходное напряжение стабилизированного источника питания.

**COMPLIANCE RANGE (ДИАПАЗОН СТАБИЛЬНОГО ТОКА)**

Диапазон напряжений, необходимый для поддержания тока постоянного уровня во всем диапазоне изменений нагрузочного сопротивления.

**CONDUCTANCE (ПРОВОДИМОСТЬ [G])**

Способность проводить электрический ток. Равносильна обратному сопротивлению (ампер на вольт), измеряется в сименсах (метрическая система) или mhos (британская система).  $G = 1/R$ .

**CONSTANT CURRENT LIMITING CIRCUIT (СХЕМА ОГРАНИЧЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА)**

Цепь ограничения тока, удерживающая выходной ток на некотором максимальном значении при перегрузках любой амплитуды.

**CONSTANT VOLTAGE CHARGE (ЗАРЯДКА ПРИ ФИКСИРОВАННОМ НАПРЯЖЕНИИ)**

Процесс заряда, при котором напряжение на клеммах батареи поддерживается на постоянном уровне.

**CONTINUOUS DUTY (НЕПРЕРЫВНЫЙ РЕЖИМ)**

Эксплуатационная характеристика, означающая работу при постоянной нагрузке в течение неопределенного времени. См. также INTERMITTENT DUTY

**CONTROL GRID (УПРАВЛЯЮЩАЯ СЕТКА)**

Сетка, обычно расположенная между катодом и анодом в качестве управляющего электрода (стандарт IEEE Std 100-1988).

**CONTROL LOOP (КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ)**

Цепь обратной связи, используемая для регулирования выходного сигнала. См. также LOOP.

**CONTROL RANGE (ДИАПАЗОН РЕГУЛИРОВАНИЯ)**

Параметр, характеризующий пределы регулирования сигнала в рамках технических характеристик прибора.

**CONTROL REMOTE (УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОЕ)**

Управление стабилизированным выходным сигналом источника питания с помощью средств, расположенных вне источника или удаленных от него. Калибруется в зависимости от условий эксплуатации.

**CONTROL RESOLUTION (РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ)**

Наименьший воспроизводимый шаг стабилизированного выходного сигнала.

**CONVECTION-COOLED POWER SUPPLY (ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ С КОНВЕКТИВНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ)**

Источник питания, в котором охлаждение осуществляется только за счет естественной конвекции газа или жидкости над поверхностью теплорассеивающих элементов.

**CONVERTER (КОНВЕРТЕР)**

Устройство, преобразующее величину или качество сигнала. Пример. DC-DC прибор, запитываемый от источника постоянного тока, и имеющий на выходе напряжение постоянного тока. См. также FLYBACK CONVERTER, FORWARD CONVERTER.

**CORE (СЕРДЕЧНИК)**

Магнитный элемент для формирования магнитного потока.

**CORONA (КОРОНА)**

1. (на воздухе) Светящийся разряд, вызванный ионизацией воздуха вблизи проводника, когда градиент потенциала превышает некоторое критическое значение. 2. (в газах) Разряд вблизи проводника, сопровождаемый слабым свечением, без существенного нагрева; ограничен зоной, в которой напряженность поля превышает определенную величину. 3. (частичный разряд) (параметр короны) Местный разряд вследствие кратковременной ионизации газа в изолированной системе, когда градиент напряжения превышает критическое значение. Обычно центры ионизации локализованы на участках между электродами системы (стандарт IEEE Std 100-1988).

**CORONA EXTINCTION VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ ПОГАСАНИЯ КОРОНЫ)**

(НПК) (параметр короны) Наибольшая величина приложенного напряжения, достигнутая в ходе постепенного его снижения в момент исчезновения коронного разряда. При синусоидальной форме напряжения НПК равно 0,707 от максимального напряжения (стандарт IEEE Std 100-1988).

**CORONA INCEPTION VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ ЗАЖИГАНИЯ КОРОНЫ [НЗК])**

(параметр короны) Наименьшая величина приложенного напряжения, когда при постепенном его увеличении возникает непрерывная корона с заданной импульсной амплитудой. При синусоидальной форме напряжения НПК равно 0,707 от максимального напряжения (стандарт IEEE Std 100-1988).

**CREEPAGE (УТЕЧКА ЭЛЕКТРОЛИТА)**

Перемещение электролита по поверхность электродов или других элементов ячейки, с которыми он не должен контактировать.

**CREEPAGE DISTANCE (ДЛИНА ПУТИ УТЕЧКИ)**

Наименьшее расстояние между двумя проводниками, измеренное вдоль соприкасающейся с ними поверхности.

**CROSS-REGULATION (ПЕРЕКРЕСТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ)**

В источниках питания с несколькими выходами — относительное изменение напряжения на одном выходе, вызванное изменением нагрузки на другом выходе.

**CROSSOVER POINT (ТОЧКА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ)**

Точка на рабочей характеристике источника с автоматическим переключением режимов стабилизации, образованная пересечением кривых, описывающих режимы стабилизации по току и напряжению. Величина сопротивления ( $E/I$ ), определяемая параметрами точки пересечения, равна согласующему импедансу, при котором от источника отбирается максимальная мощность. См. также AUTOMATIC CROSSOVER.

**CROSSOVER, VOLTAGE/CURRENT (СМЕНА РЕЖИМОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА/НАПРЯЖЕНИЯ)**

Свойство источника питания автоматически переходить от режима стабилизации напряжения к режиму стабилизации тока (и обратно) в соответствии с установленными ограничениями.

**CROWBAR (ШУНТИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО)**

Цепь защиты от перенапряжения, обеспечивающая быстрое шунтирование выхода источника низкоомным сопротивлением, когда выходное напряжение превышает заданное значение.

**CSA (Canadian Standards Association):**

Канадская ассоциация стандартов.

**CURRENT CONTROL (РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА)**

См. CURRENT STABILIZATION.

**CURRENT FOLDBACK (ОБРАТНАЯ ПОДАЧА ТОКА)**

См. FOLDBACK CURRENT LIMITING

**CURRENT LIMIT KNEE (КОЛЕНО ТОКОВОЙ КРИВОЙ)**

Точка на графике «ток-напряжение», на которой начинается обратная подача тока (ограничение).

**CURRENT LIMITING (ОГРАНИЧИТЕЛЬ ТОКА)**

Электронная схема защиты от перегрузки, ограничивающая максимальный ток до предустановленного значения.

**CURRENT MODE (РЕЖИМ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА)**

Режим работы, при котором стабилизируется ток.

**CURRENT SENSING RESISTOR (ТОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ РЕЗИСТОР)**

Резистор, включенный параллельно нагрузке, с которого снимается напряжение, пропорциональное току нагрузки.

**CURRENT SOURCE (ИСТОЧНИК ТОКА)**

Источник питания, вырабатывающий ток постоянной величины.

**CURRENT STABILIZATION (СТАБИЛИЗАЦИЯ) ТОКА**

Процесс, при котором поддерживается постоянное значение тока.

**D****DC**

Аббревиатура термина «постоянный ток». В тексте: прописные буквы «dc».

**DC COMPONENT (ПОСТОЯННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ)**

Постоянная величина, присутствующая в переменном токе и расположенная на уровне, отличном от нуля.

**DC-DC CONVERTER (КОНВЕРТЕР DC-DC)**

Цепь или устройство, преобразующее входной сигнал постоянного тока в выходной сигнал постоянного тока с отличающимся значением.

**DECAY TIME (ВРЕМЯ ЗАТУХАНИЯ)**

См. FALL TIME

**DERATING (ПОНИЖЕНИЕ НОМИНАЛА)**

Намеренное уменьшение показателя нагрузка/прочность (применительно к конкретному объекту или области использования), обычно в целях снижения отказов, связанных с нагрузкой (стандарт IEEE Std 100-1988).

**DIELECTRIC (ДИЭЛЕКТРИК)**

Изоляционный материал между двумя проводниками.

**DIELECTRIC CONSTANT  
(ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ [K])**

Для данного диэлектрика определяется как отношение емкости конденсатора, использующего данный диэлектрик к емкости конденсатора со стандартным диэлектриком (воздухом или вакуумом).

**DIELECTRIC WITHSTAND VOLTAGE  
(ДИЭЛЕКТРИКА НАПРЯЖЕНИЕ ПРОБОЯ)**

Напряжение, при котором наступает пробой диэлектрика. См. также HI-POT TEST, ISOLATION.

**DIFFERENTIAL VOLTAGE  
(ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ)**

Разность напряжений между двумя точками, измеренными по отношению к опорному уровню.

**DRIFT (ДРЕЙФ)**

Изменение выхода за некоторый временной интервал, независимо от входа, окружающих условий или нагрузки.

**DRIVER (ДРАЙВЕР)**

Токовый усилитель, используемый для управления другим устройством или цепью.

**DUTY CYCLE (РАБОЧИЙ ЦИКЛ)**

1. Отношение длительностей включенного и отключенного состояний повторяющихся событий. 2. Рабочий режим ячейки или батареи с учетом таких факторов, как скорость заряда и разряда, степень разряда, продолжительность цикла и длительность режима ожидания.

**DYNAMIC FOCUS (ДИНАМИЧЕСКАЯ ФОКУСИРОВКА)**

Способ модуляции фокусирующего напряжения как функции положения электронного пучка (компания Bertan High Voltage).

**DYNAMIC LOAD (ДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА)**

Нагрузка, быстро изменяющаяся от одного значения к другому. Корректное определение д. н. должно включать как величину полного изменения, так и его скорость.

**Е****EARTH (ЗЕМЛЯ)**

Электрическое соединение с землей, часто в форме стержня (стержней) или решетки. См также GROUND.

**E-BEAM (Э-ЛУЧ)**

Электронный луч (компания Bertan High Voltage).

**EDDY CURRENTS (ВИХРЕВЫЕ ТОКИ)**

Замкнутые токи, индуцируемые переменным магнитным полем в проводнике.

**EFFECTIVE VALUE (ЭФФЕКТИВНОЕ ЗНАЧЕНИЕ)**

Величина сигнала, создающая такой же тепловой эффект, как постоянный ток равного значения. Для синусоидального сигнала э. з. равно 0,707 от амплитуды. Для несинусоидального сигнала э. з. равно его среднеквадратичной величине (с. к. в.).

**EFFICIENCY (КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ)**

1. Отношение (в процентах) полных значений выходной и входной мощности при заданных условиях.  
2. Отношение выходного тока батареи (ячейки) в разряженном состоянии к входному току, необходимому для восстановления ее исходного состояния при заданных условиях.

**ELECTRIC (ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ)**

Содержащий, генерирующий электричество, возникающий под действием электричества или предназначенный для него. Примеры: электрические уголь, энергия, двигатель, транспортное средство, волна. Прим.: некоторые иностранные словари используют как синонимы слова «electric» и «electrical», однако в электротехнике общепринятым является вышеуказанное понятие. Следует признать, что существуют пограничные случаи, когда термин определяется сферой использования. См. ELECTRICAL. (стандарт IEEE Std 100-1988).

**ELECTRICAL (ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ)**

(общ.) Относящийся, принадлежащий или связанный с электричеством, но не обладающий его характеристиками или свойствами. Примеры: инженер-электрик, электроизолятор, электротехнический справочник, электрический номинал, школа, прибор.

**ELECTRON BEAM (ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ)**

Скопление электронов в виде параллельной, расходящейся или сходящейся конфигурации.

**ELECTRON (ЭЛЕКТРОН [e-])**

Элементарная частица с отрицательным зарядом.

**ELECTRON GUN (ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА)**

(электронная трубка) Электродная конструкция, генерирующая электронный луч с возможностью фокусировки, отклонения и сведения одного или более лучей (стандарт IEEE Std 100-1988).

**ELECTRONIC (ЭЛЕКТРОННЫЙ)**

Прибор, цепь или система, использующие электронные устройства, или качество, относящееся к электронике. Примеры: электронное управление, электронная аппаратура, электронный инструмент, электронная схема (стандарт IEEE Std 100-1988).

**ELECTRONIC LOAD (ЭЛЕКТРОННАЯ НАГРУЗКА)**

Испытательное средство, предназначенное для отбора от источника различных заданных величин мощности или тока.

**ELECTRON VOLT (ЭЛЕКТРОН-ВОЛЬТ)**

Мера энергии, равная ее количеству, которое требуется электрону для преодоления разности потенциалов в 1 В.



**ELECTROPHORESIS (ЭЛЕКТРОФОРЕЗ)**

Движение макроионов под действием приложенного электрического потенциала (стандарт IEEE Std 100-1988).

**EMF (Electromotive Force)**

Сокр. электродвижущая сила.

**EMI (Electromagnetic Interference):**

Сокр. электромагнитные помехи.

**EMI FILTER (ФИЛЬТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ)**

Схема, состоящая из реактивных и резистивных компонентов для ослабления радиочастотных помех, излучаемых источником питания.

**EMI FILTERING****(ФИЛЬТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ)**

Процесс или набор элементов для уменьшения электромагнитных помех излучаемых или получаемых электронным прибором. См. также EMI.

**EMISSION (ЭМИССИЯ)**

1. (в лазерах, мазерах) перенос энергии из вещества в форме излучения. 2. (высокочастотная шумовая эмиссия) Здесь: процесс выделения или испускания электромагнитной энергии (стандарт IEEE Std 100-1988).

**EMISSION CURRENT (ЭМИССИИ, ТОК)**

Ток, порождаемый электронной эмиссией (стандарт IEEE Std 100-1988).

**EQUIVALENT CIRCUIT (ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА)**

Электрическая схема, моделирующая основные свойства устройства или цепи.

**EQUIVALENT LOAD (ЭКВИВАЛЕНТНАЯ НАГРУЗКА)**

Электрическая схема, моделирующая основные свойства нагрузки.

**EQUIVALENT SERIES INDUCTANCE (ESI)****(ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ КОНДЕНСАТОРА [ЭПИ])**

Величина индуктивности, соединенной последовательно с идеальным конденсатором, за счет которой в точности воспроизводятся параметры реального конденсатора.

**EQUIVALENT SERIES RESISTANCE (ESR)****(ЭКВИВАЛЕНТНОЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНДЕНСАТОРА [ЭПС])**

Величина сопротивления, соединенного последовательно с идеальным конденсатором, за счет которого в точности воспроизводятся параметры реального конденсатора

**ERROR AMPLIFIER (УСИЛИТЕЛЬ ОШИБКИ)**

Операционный (или дифференциальный) усилитель, включенный в контур управления, который выдает сигнал ошибки при наличии разницы между выходным сигналом системы и опорным уровнем.

**ERROR SIGNAL (СИГНАЛ ОШИБКИ)**

Выходное напряжение усилителя ошибки, равное разности между входным и опорным сигналами, умноженной на коэффициент усиления.

**ERROR VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ ОШИБКИ)**

Выходное напряжение усилителя ошибки в контуре управления.

**ESD (Electrostatic Discharge)**

Сокр. электростатический разряд.

**ESL (Equivalent Series Inductance)**

Сокр. эквивалентная последовательная индуктивность.

**ESR (Equivalent Series Resistance)**

Сокр. эквивалентное последовательное сопротивление.

## F

**FAILURE MODE (СОСТОЯНИЕ ОТКАЗА)**

Прекращение работы и выход устройства в состояние с предустановленным минимальным набором функций.

**FALL TIME (ВРЕМЯ СПАДА)**

Время, которое требуется для уменьшения импульса с 90 до 10 % от его максимального значения.

**FAN COOLED (ВЕНТИЛЯТОРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ)**

Способ принудительного воздушного охлаждения устройства в целях повышения его эксплуатационных качеств.

**FARAD (ФАРАД)**

Единица измерения емкости. Конденсатор емкостью в 1 Ф накапливает заряд в 1 Кл при разности потенциалов 1 В.  $C = Q/E$ .

**FEEDBACK (ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ)**

Подача части выходного сигнала системы на ее вход.

**FEED FORWARD (ПРЯМОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ)**

Метод управления, при котором стабилизация источника по сети питания улучшается за счет непосредственного измерения входного (сетевое) напряжения.

**FEED THROUGH (ПРОХОДНОЙ КОНТАКТ)**

Сквозное отверстие в печатной плате, через которое осуществляется электрическое соединение разволок верхней и нижней частей платы.

**FERRITE (ФЕРРИТ)**

Керамический материал, имеющий малые потери на высоких частотах, состоящий из смеси окислов железа с окислами или углеродными соединениями других металлов — марганца, цинка, никеля, магния.

**FET (Field Effect Transistor)**

Сокр. полевой транзистор.

**FIELD EFFECT TRANSISTOR (FET)****(ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР [ПТ])**

Транзистор, в котором сопротивление токопроводящего участка между истоком и стоком управляется поперечным электрическим полем, приложенным между двумя электродами. См. также JUNCTIONFIELD EFFECT TRANSISTOR, METAL OXIDE, SEMICONDUCTOR FIELD EFFECT TRANSISTOR.

**FIELD EMISSION (АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ)**

Эмиссия электронов с поверхности под действием высокого градиента напряжения, существующего на данной поверхности (стандарт IEEE Std 100-1988).

**FIELD EMISSION GUN (АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИОННАЯ ПУШКА)**

Электронная пушка с электродом-экстрактором, извлекающим электроны из катода.

**FILAMENT (НИТЬ НАКАЛА)**

Горячий катод в форме нити или ленты, подогреваемый за счет проходящего через него тока. Примечание: известен также как катод прямого накала (стандарт IEEE Std 100-1988).

**FILAMENT CURRENT (ТОК НАКАЛА)**

Ток, подаваемый в нить накала и нагревающий ее (стандарт IEEE Std 100-1984).

**FILAMENT OUTPUT (ВЫХОД НАКАЛА)**

Мощность, нагревающая катод в электронно-лучевых колоннах, ЭЛТ или рентгеновских трубках. В некоторых устройствах выход накала привязан к ускоряющему напряжению. (Bertan High Voltage).

**FILAMENT VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ НАКАЛА)**

Напряжение между выводами нити накала (стандарт IEEE Std 100-1988).

**FILTER (ФИЛЬТР)**

Один или несколько элементов, установленных в цепь для ослабления сигнала в определенной полосе частот.

**FLASHOVER (ПОВЕРХНОСТНЫЙ ПРОБОЙ)**

1. (общ.) Электрический разряд в воздухе вокруг или над поверхностью твердого или жидкого изолятора, между точками с различающимися потенциалами или полярностью, возникший вследствие воздействия напряжения в местах, где пробиваемый участок становится достаточно ионизированным для поддержания электрической дуги. 2. (высоковольтная изоляция кабелей переменного тока) Электрический пробой вокруг или на поверхности изолирующей среды, между точками разного потенциала или полярности, в местах, где участок пробоя становится достаточно ионизированным для поддержания электрической дуги. 3. (высоковольтные испытания) Электрический пробой над поверхностью твердого диэлектрика в газовой или жидкой среде (стандарт IEEE Std 100-1988).

**FLOATING NETWORK OR COMPONENT (ПЛАВАЮЩАЯ СЕТЬ ИЛИ ЭЛЕМЕНТ)**

Сеть или элемент, не имеющие подключения к потенциалу земли (стандарт IEEE Std 100-1988).

**FLOATING OUTPUT (ПЛАВАЮЩИЙ ВЫХОД)**

Выход источника питания без заземления, когда в качестве нулевого уровня выходной клеммы взято другое напряжение.

**FLYBACK CONVERTER (КОНВЕРТЕР ОБРАТНОГО ХОДА)**

Ключевая схема на одном (обычно) транзисторе. В течение первой половины цикла переключения транзистор открыт, и энергия накапливается в первичной обмотке трансформатора, а в течение второй половины она поступает во вторичную обмотку и в нагрузку.

**FOCUS (ФОКУС)**

(осциллография) Максимальное сведение электронного луча в малое пятно на люминесцентном экране (стандарт IEEE Std 100-1988).

**FOCUSING ELECTRODE (ФОКУСИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОД)**

(ЭЛТ) Электрод, потенциал которого управляет фокусировкой электронного пучка (стандарт IEEE Std 100-1988).

**FOLDBACK CURRENT LIMITING (ЦЕПЬ ОБРАТНОЙ ПОДАЧИ ТОКА)**

Цепь защиты источника питания, посредством которой выходной ток уменьшается с ростом перегрузки и достигает минимума при коротком замыкании. Тем самым снижается рассеяние мощности при перегрузке. Цепь обратной подачи тока обычно используется совместно с линейным стабилизатором.

**FORWARD CONVERTER (КОНВЕРТЕР ПРЯМОГО ХОДА)**

Ключевая схема в источнике питания, посредством которой происходит передача энергии во вторичную обмотку трансформатора при открытом ключевом транзисторе.

**FREE WHEEL DIODE (ШУНТИРУЮЩИЙ ДИОД)**

В импульсном источнике питания с ШИМ: диод, обеспечивающий отвод противо-ЭДС в выходном дросселе.

**FREQUENCY (ЧАСТОТА)**

Число циклов в единицу времени (в герцах).

**FULL BRIDGE CONVERTER (ПОЛНОМОСТОВОЙ КОНВЕРТЕР)**

Импульсная схема, содержащая четыре ключа, соединенных в мостовую схему. Служит для возбуждения первичной обмотки трансформатора.

**FULL BRIDGE RECTIFIER (ПОЛНОМОСТОВОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ)**

Выпрямитель, в котором имеется по четыре диода на фазу сигнала.

**FULL WAVE RECTIFIER (ДУХПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ)**

Выпрямитель, в котором выход постоянного тока реализуется за каждый полупериод переменного тока.

**FUSE (ПРЕДОХРАНИТЕЛЬ)**

Устройство, разрывающее электрическую цепь при перегрузке. См. также OVERCURRENT DEVICE, OVERCURRENT PROTECTIVE DEVICE, OVERCURRENT DEVICE, OVERCURRENT PROTECTIVE DEVICE.

## G

**GAIN (УСИЛЕНИЕ)**

Отношение выходного сигнала к входному. См. также CLOSED LOOP GAIN, GAIN MARGIN, OPEN LOOP GAIN.

**GAUSS (ГАУСС)**

Единица плотности магнитного потока в максвеллах на квадратный сантиметр поперечного сечения. 1 Гс равен 10<sup>-4</sup> Тл.

**GLITCH (ВЫБРОС)**

1. Паразитный нестационарный всплеск напряжения в сигнале. 2. Небольшая проблема, возникшая в электроаппаратуре.

**GPIB (General purpose interface bus):**

Универсальная шина обмена IEEE-488 (Bertan High Voltage).

**GRID (СЕТКА)**

1. В батареях: рамка для пластин и электродов, удерживающая активный материал и служащая в качестве токового коллектора. 2. В электровакуумных устройствах: элемент управления потоком электронов. 3. Конфигурация из двух множеств равностоящих параллельных линий, одно из которых перпендикулярно другому.

**GROUND (ЗАЕМЛЕНИЕ)**

Проводящее соединение (намеренное или случайное) электрической цепи или электроаппаратуры с землей или с используемым вместо нее проводящим телом (National Electric Code).

**GROUND BUS (ШИНА ЗАЕМЛЕНИЯ)**

Шина, к которой подведены отдельные заземляющие провода системы, и которая, в свою очередь, заземлена в одной или нескольких точках.

 **GROUNDED (ЗАЕМЛЕННЫЙ)**

Подключенный к земле или контактирующий с землей, или подключенный к проводящему телу, выполняющему роль земли.

**GROUND LOOP (ПЕТЛЯ ЗАЕМЛЕНИЯ)**

Ситуация, при которой возникают паразитные напряжения вследствие использования общего провода зануления или заземления для нескольких цепей.

## H

**HALF-BRIDGE CONVERTER (ПОЛУМОСТОВОЙ КОНВЕРТЕР)**

Ключевой источник питания, в котором используются два ключевых устройства для возбуждения первичной обмотки трансформатора. См. также BRIDGE RECTIFIER.

**HALF-WAVE RECTIFIER (ПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ)**

Элемент (например диод), выпрямляющий только одну полуволну входного напряжения; на выходе п.п.в. формируется пульсирующее напряжение одного знака.

**HEADROOM (РАЗБРОС)**

Разница между полным и выходным напряжением линейного последовательного проходного стабилизатора. См. также DIFFERENTIAL VOLTAGE.

**HEAT SINK (ТЕПЛОТВОД)**

Средство для рассеяния тепла.

**HENRY (H) (ГЕНРИ [Г])**

Единица измерения индуктивности. Катушка, индуктивность которой 1 Гн, создает эдс в 1 В при прохождении через нее тока, изменяющегося со скоростью 1 А/с.

**HERTZ (Hz) (ГЕРЦ [Гц])**

Единица измерения частоты в системе СИ, названная в честь Генриха Герца, открывшего электромагнитные волны. 1 Гц соответствует одному колебанию в секунду.

**HICCUP (ВНЕЗАПНЫЙ СБОЙ)**

Нестационарный процесс, нарушающий работу контура регулирования.

**HIGH LINE (НАИВЫСШЕЕ СЕТЕВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ)**

Максимальное разрешенное входное (сетевое) напряжение.

**HIGH VOLTAGE ASSEMBLY (ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ БЛОК)**

Часть высоковольтного источника питания, содержащая цепи высокого напряжения, определяющие эксплуатационные параметры и надежность источника питания (Bertan High Voltage).

**HI-POT TEST (ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ)**

Определение электрической прочности изоляционного материала путем приложения высокого напряжения к двум изолированным точкам устройства в течение определенного времени.

**HOLDING TIME (ВРЕМЯ УДЕРЖИВАНИЯ)**

См. HOLDUP TIME.

**HOLDUP TIME (ВРЕМЯ УДЕРЖАНИЯ)**

Время, в течение которого выход источника питания остается в заданных пределах при потере или снятии входного питания. Известно под названиями: время удерживания, время поддержания непрерывности.

**HYBRID SUPPLIES (ГИБРИДНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ)**

Источник, в котором сочетаются два или несколько методов стабилизации, например, феррорезонансный и линейный, а также такой, который использует достоинства гибридной технологии.

## I

**I-BEAM (И-ЛУЧ)**

Ионный луч: (Bertan High Voltage).

**IC (ИС)**

Сокр. интегральная схема.

**IEC (International Electrotechnical Commission):**

Сокр. международная комиссия по электротехнике.

**IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers):**

Сокр. Институт инженеров по электротехнике и электронике.

**IMPEDANCE (Z) (ИМПЕДАНС [Z])**

Полное сопротивление переменному току, включающее реактивный и активный компоненты.

**INDUCED CURRENT (ИНДУЦИРОВАННЫЙ ТОК)**

Ток, возникающий в результате действия эдс.

**INDUCED EMF (ИНДУЦИРОВАННАЯ ЭДС)**

Напряжение, индуцированное в проводнике, находящемся в переменном магнитном поле.

**INPUT (ВХОД <УПРАВЛЕНИЯ>)**

Служит для удаленного выключения источника питания.

**INDUCED IMPEDANCE (ВХОДНОЙ ИМПЕДАНС)**

Импеданс по отношению к входным зажимам цепи или устройствам при свободном входе.

**INPUT LINE FILTER (СЕТЕВОЙ ФИЛЬТР)**

Низкочастотный или полосовой режекторный фильтр на входе источника питания, предназначенный для уменьшения сетевых помех. Данный фильтр может быть внешним по отношению к источнику.

**INDUCED SURGE (НАВЕДЕННОЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЕ)**

См. INRUSH CURRENT.

**INPUT VOLTAGE RANGE****(ДИАПАЗОН ВХОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ)**

Пределы изменения входного напряжения, в которых источник или иное устройство работают нормально.

**INRUSH CURRENT (БРОСОК ТОКА)**

Кратковременное пиковое значение тока на входе источника при его включении.

**INSTANTANEOUS VALUE (МГНОВЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ)**

Значение сигнала, измеренное в данный момент времени.

**INSULATION (ИЗОЛЯЦИЯ)**

Изоляционный материал, используемый для электрического разделения цепей.

**INSULATION RESISTANCE (СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ)**

Сопротивление (в омах), которое оказывает изоляционный материал току, возникающему под действием постоянного напряжения.

**INVERTER (ИНВЕРТОР)**

1. Устройство, которое преобразует мощность постоянного тока в мощность переменного тока. 2. Цепь, элемент цепи или устройство, инвертирующее входной сигнал.

**ION BEAM (ИОННЫЙ ЛУЧ)**

Скопление ионов, которое может быть параллельным, сходящимся или расходящимся (Bertan High Voltage).

**ION GUN (ИОННАЯ ПУШКА)**

Устройство, аналогичное электронной пушке, в которой заряженными частицами являются ионы. Пример: протонная пушка (стандарт IEEE Std 100-1988).

**ISOLATION (ИЗОЛЯЦИЯ)**

Электрическое разделение двух цепей или элементов цепи.

**ISOLATION TRANSFORMER (ИЗОЛИРУЮЩИЙ ТРАНСФОРМАТОР)**

Трансформатор, у которого коэффициент трансформации равен 1. См. также STEP-DOWN TRANSFORMER, STEP-UP TRANSFORMER, TRANSFORMER.

**ISOLATION VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ)**

Максимально допустимое постоянное или переменное напряжение, которое может быть приложено между двумя изолированными цепями.

**J****JOULE (J) (ДЖОУЛЬ [ДЖ])**

Единица энергии, равная 1 Вт, помноженному на секунду.

**K****KELVIN (K) (КЕЛЬВИН [K])**

1. Единица температуры в международной системе СИ, равная 1/273,16 термодинамической температуры тройной точки воды. Шкала Кельвина сдвинута влево на 273,16 относительно шкалы Цельсия. Температура 0 К является абсолютным нулем. Для перевода в температуру Кельвина в температуру Цельсия нужно добавить 273,16. 2. Метод изоляции токонесущих и измерительных проводников с использованием четырех клемм.

**KIRCHOFF'S CURRENT LAW (ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФФА)**

В любой точке цепи алгебраическая сумма токов равна нулю.

**KIRCHOFF'S VOLTAGE LAW (ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФФА)**

Вдоль любого замкнутого контура цепи алгебраическая сумма напряжений равна нулю.

**L****LATCH-UP (ФИКСИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО)**

Часть цепи управления источника питания для перевода его в фиксированное состояние.

**L-C FILTER (LC-ФИЛЬТР)**

Низкочастотный фильтр, состоящий из индуктивности (L) и емкости (C). Также: усредняющий фильтр.

**LEAKAGE CURRENT (ТОК УТЕЧКИ)**

1. Постоянный или переменный ток, который при заданном напряжении протекает от входа к выходу и (или) к шасси изолированного устройства. 2. Обратный ток полупроводникового перехода.

**LED (СДИ)**

Светодиодный индикатор.

**LINE (ЛИНИЯ)**

1. Среда, по которой передается электроэнергия между цепями и устройствами. 2. Напряжение в сети. См. также HIGH LINE, LOW LINE.

**LINEAR (ЛИНЕЙНЫЙ)**

1. Находящийся на прямой линии. 2. Математическое соотношение, характеризующее прямую пропорциональность двух величин, график которого представляет собой прямую.

**LINEARITY (ЛИНЕЙНОСТЬ)**

1. Идеальное качество, при котором одна величина изменяется пропорционально другой; на графике это отображается прямой линией. 2. Общеупотребительный термин в контексте понятия «Ошибка линейности».

**LINEAR SUPPLY REGULATION (ЛИНЕЙНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПИТАНИЯ)**

Отклонение выходной величины от заданной эталонной линии.

**LINEAR PASS (ЛИНЕЙНЫЙ ПЕРЕХОД)**

См. SERIES PASS

**LINEAR REGULATION (ЛИНЕЙНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ)**

Метод стабилизации, при котором управляющее устройство, такое как транзистор, помещается последовательно или параллельно на линии. Выходная величина регулируется за счет изменения эффективного сопротивления управляющего устройства с тем, чтобы рассеять неиспользуемую энергию. См. также LINEAR SUPPLY, REGULATION.

**LINEAR REGULATOR (ЛИНЕЙНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР)**

Трансформатор напряжения или силовое устройство, подключенное последовательно к нагрузке от источника питания постоянного напряжения так, чтобы обратный ток последовательного стабилизатора изменял его перепад напряжения таким образом, чтобы поддерживать постоянный ток на выходе.

**LINEAR SUPPLY REGULATION (ЛИНЕЙНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПИТАНИЯ)**

Электронный источник питания с применением методов линейной стабилизации. См. также LINEAR REGULATION.

**LINE CONDITIONER (СЕТЕВОЙ СТАБИЛИЗАТОР)**

Цепь или устройство, улучшающее качество сети переменного тока.

**LINE EFFECT (ВЛИЯНИЕ СЕТИ)**

См. LINE REGULATION.

**LINE REGULATION (СТАБИЛЬНОСТЬ ПО СЕТИ)**

Относительное изменение (в процентах) выхода вследствие изменения в установленных пределах входного напряжения при заданных значениях нагрузки и остальных постоянных параметрах.

**LINE REGULATOR (СТАБИЛИЗАТОР СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ)**

Прибор для стабилизации и изменения входного напряжения.

**LINE TRANSIENT (СЕТЕВЫЕ ВЫБРОСЫ)**

Возмущения сетевого напряжения, выходящие за пределы рабочего диапазона входного или питающего напряжения.

**LOAD (НАГРУЗКА)**

Емкость, сопротивление, индуктивность или их комбинация, которая, будучи подключенной к цепи, определяет ее ток и потребляемую мощность.

**LOAD DECOUPLING (РАЗВЯЗКА НАГРУЗКИ)**

Способ размещения фильтрующих элементов в нагрузке в целях снижения шумов.

**LOAD EFFECTS (ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ)**

См. LOAD REGULATION.

**LOAD IMPEDANCE (ИМПЕДАНС НАГРУЗКИ)**

Комплексное сопротивление току нагрузки, состоящее из активной и реактивной части.

**LOAD REGULATION (СТАБИЛЬНОСТЬ ПО НАГРУЗКЕ)**

1. Статическая: величина изменения выходного напряжения при изменении нагрузки от минимального до максимального значения и от максимального до минимального, когда остальные факторы поддерживаются на их постоянном уровне. 2. Динамическая: относительное изменение выходного напряжения (в процентах) при ступенчатом изменении тока нагрузки. При этом должны быть заданы начальное и конечное значения тока вместе со скоростью изменения. Скорость изменения выражается в приращении тока за единицу времени, например 20 А/мкс. Динамическая стабильность выражается как  $\pm$  % отклонения (peak-to-peak) в наихудшем случае для источника постоянного тока, и как СКВ отклонения в наихудшем случае для источника переменного тока.

**LOCAL CONTROL (МЕСТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ)**

Регулирование стабилизированного выходного параметра с помощью средств, размещенных внутри источника питания или непосредственно на нем. В зависимости от условий могут калиброваться.

**LOCAL SENSING (ЛОКАЛЬНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ)**

Использование выводов источника питания в качестве точек измерения и формирования сигнала ошибки для организации обратной связи в стабилизаторе напряжения.

**LOGIC HIGH (ЛОГИЧЕСКИЙ СИГНАЛ ВЫСОКОГО УРОВНЯ)**

Напряжение, соответствующее единице (1) в прямой логике.

**LOGIC INHIBIT/ENABLE (ЛОГИЧЕСКИЙ ЗАПРЕТ/РАЗРЕШЕНИЕ)**

Логический уровень (относительно земли или изолированный), вызывающий выключение или включение источника.

**LOGIC LOW (ЛОГИЧЕСКИЙ СИГНАЛ НИЗКОГО УРОВНЯ)**

Напряжение, соответствующее нулю (0) в прямой логике.

**LONG-TERM STABILITY (ДОЛГОВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ)**

Изменение выходного напряжения источника (в %) с течением времени при поддержании постоянства остальных факторов. Долговременная стабильность зависит от старения элементов.

**LOOP (КОНТУР)**

Замкнутый путь, по которому проходит сигнал. См. также CLOSED LOOP, CONTROL LOOP, OPEN LOOP.

**LOOP GAIN (УСИЛЕНИЕ В КОНТУРЕ)**

Соотношение значений сигнала в двух разных точках контура. См. также GAIN.

**LOOP RESPONSE (ОТКЛИК КОНТУРА)**

Скорость, с которой в контуре происходят изменения нагрузки.

**LOOP STABILITY (УСТОЙЧИВОСТЬ КОНТУРА)**

Термин, обозначающий устойчивость контура, измеренную по какому-либо критерию, например, запас по фазе или запас по усилению.

**LOW LINE (НИЗКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ)**

Наименьшее допустимое входное напряжение.

**M****MAINS (ЭЛЕКТРОСЕТЬ)**

Переменного тока общего пользования.

**MASTER-SLAVE OPERATION (АЛГОРИТМ «ВЕДУЩИЙ-ВЕДОМЫЙ»)**

Способ комплексирования двух или нескольких источников, когда один (ведущий) управляет другими (ведомыми). Выходы ведомых источников всегда равны или пропорциональны выходу ведущего.

**MAXIMUM LOAD (МАКСИМАЛЬНАЯ НАГРУЗКА)**

1. Максимально допустимая производительность <выходная мощность> по нескольким или всем выходам при заданных условиях, включая рабочий цикл, период, амплитуду. 2. Максимально разрешенная номинальная мощность источника в наилучших условиях.

**MINIMUM LOAD (МИНИМАЛЬНАЯ НАГРУЗКА)**

1. Наименьший ток источника питания постоянного тока при условии, что напряжение находится в установленных пределах. 2. При постоянной величине выходного тока: максимально возможное сопротивление нагрузки.

**MODULAR (МОДУЛЬНЫЙ)**

1. Термин для описания источника питания, состоящего из отдельных узлов — модулей — входного, выходного, фильтрующего. 2. Отдельный прибор со стандартными размерами, приспособленный для интегрирования вместе с другими устройствами в более сложную и производительную систему.

**MODULATOR (МОДУЛЯТОР)**

Управляющий элемент в ключевом источнике питания.

**MOSFET (МОП)**

Сокр. МОП-транзистор.

**MTBF (СВНО)**

Сокр. среднее время наработки на отказ.

**N****NEGATIVE FEEDBACK****(ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ)**

1. (цепи и системы) Процесс, при котором часть сигнала выходной цепи усилительного устройства воздействует на его входную цепь, противодействуя, таким образом, начальному возмущению и снижая коэффициент усиления. 2. (регулирование, промышленная автоматика) Сигнал обратной связи, сформированный и направленный таким образом, чтобы уменьшить породившее его изменение. 3. (подавление <шумов>), (устойчивая обратная связь) (передача данных) Процесс, при котором часть мощности выходного тока усилительного устройства воздействует на его входную цепь, уменьшая начальное возмущение и при этом снижая коэффициент усиления (стандарт IEEE Std 100-1988).

**NEGATIVE RAIL (ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ШИНА)**

Один из двух выходных проводников источника питания, потенциал которого меньше.

**NEGATIVE REGULATOR (СТАБИЛИЗАТОР ОТРИЦАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ)**

Стабилизатор, выходное напряжение которого имеет отрицательный знак относительно обратного провода.

**NEGATIVE TEMPERATURE COEFFICIENT (ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ)**

Характеризует уменьшение параметра (сопротивления, емкости, напряжения и т. д.) с ростом температуры.

**NODE (УЗЕЛ)**

Точка соединения двух и более ветвей цепи.

**NOISE (ШУМ)**

Апериодическая составляющая выхода источника питания, не связанная с ним или частотой переключения. В общем случае величина шума выражается как удвоенная амплитуда (peak-to-peak) в заданной полосе частот.

**NO LOAD VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ ХОЛОСТОГО ХОДА)**

Напряжение на зажимах батареи или блока питания в отсутствии тока во внешней цепи. См. OPEN CIRCUIT VOLTAGE.

**NOMINAL VALUE (НОМИНАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ)**

Свойство или компонент, приписанное или объективное, в действительности не являющиеся результатом измерений.

**NOMINAL VOLTAGE (НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ)**

Приписанная или объективная величина данного напряжения, в действительности не являющаяся результатом измерений.

## O

**OFF LINE POWER SUPPLY  
(РЕЗЕРВНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ)**

1. Источник питания, в котором выпрямление сетевого напряжения осуществляется без использования развязывающего трансформатора сетевой частоты. 2. Источник питания, который приводится в действие при потере сети, не допуская существенного прерывания питания нагрузки. См. также UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY.

**OFFSET CURRENT (ТОК СМЕЩЕНИЯ)**

Ток на выводах усилителя постоянного тока при отключенном входном источнике. Входит как составляющая в погрешность устройства.

**OFFSET VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ)**

Напряжение постоянного тока на входных зажимах усилителя постоянного тока при нулевом выходном напряжении.

**OHM (OM)**

Единица сопротивления.

**OHM (OM)**

Разность потенциалов между клеммами элемента или напряжение при разомкнутой цепи (состояние холостого хода). См. NO LOAD VOLTAGE.

**OP-AMP (OU)**

Сокр. операционный усилитель.

**OPEN-FRAME CONSTRUCTION  
(КОНСТРУКЦИЯ ОТКРЫТОГО ТИПА)**

Технология изготовления, при которой источник питания выпускается без корпуса.

**OPEN LOOP (РАЗОМКНУТЫЙ КОНТУР)**

Тракт сигнала без замыкания обратной связи.

**OPEN LOOP GAIN (КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ  
РАЗОМКНУТОГО КОНТУРА)**

Отношение выходного сигнала к входному при разомкнутой обратной связи.

**OPERATING TEMPERATURE RANGE  
(РАБОЧИЙ ДИАПАЗОН ТЕМПЕРАТУР)**

Диапазон изменения температуры окружающей среды, базовой платы или корпуса источника питания, в котором источник работает безопасно и в пределах технических характеристик. См. также AMBIENT TEMPERATURE, STORAGE TEMPERATURE.

**OPERATIONAL AMPLIFIER (OP-AMP)  
(ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ [OU])**

Прибор с дифференциальным входом и высоким коэффициентом усиления, повышающий величину приложенного сигнала и вырабатывающий напряжение ошибки.

**OPERATIONAL POWER SUPPLY  
(ОПЕРАЦИОННЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ)**

Источник питания на основе стабилизатора, разомкнутый контур которого имеет высокий коэффициент усиления. Действует подобно операционному усилителю и может настраиваться с помощью пассивных элементов.

**OPTO-COUPLER (ОПТРОННАЯ ПАРА)**

Комбинация из светоизлучателя и фотоприемника, используемая для передачи сигналов между гальванически развязанными цепями.

**OPTO-ISOLATOR (ОПТИЧЕСКАЯ РАЗВЯЗКА)**

См. OPTO-COUPLER.

**OSCILLATOR (ГЕНЕРАТОР)**

Устройство для получения переменного тока без эффектов механического вращения; выходная частота устройства определяется его параметрами (стандарт IEEE Std 100-1988).

**OUTPUT (ВЫХОД)**

Энергия или данные, исходящие из цепи или устройства.

**OUTPUT CURRENT LIMITING  
(ОГРАНИЧЕНИЕ ВЫХОДНОГО ТОКА)**

Защитная функция, удерживающая выходной ток источника при его перегрузке в предписанных пределах, предохраняющая источник или нагрузку от повреждения.

**OUTPUT FILTER (ВЫХОДНОЙ ФИЛЬТР)**

Устройство из одного или нескольких дискретных элементов, используемое для ослабления пульсаций на выходе и шумов.

**OUTPUT IMPEDANCE (ВЫХОДНОЙ ИМПЕДАНС)**

Импеданс на выходных зажимах источника питания.

**OUTPUT RANGE (ДИАПАЗОН ВЫХОДНОГО ПАРАМЕТРА)**

Специфицированный диапазон, в пределах которого регулируется выходной параметр (напряжение или ток) источника.

**OUTPUT RIPPLE AND NOISE  
(ВЫХОДНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ И ШУМЫ)**

См. PERIODIC и RANDOM DEVIATION.

**OUTPUT VOLTAGE (ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ)**

Напряжение на выходных зажимах источника питания.

**OUTPUT VOLTAGE ACCURACY  
(ПОГРЕШНОСТЬ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ)**

Допустимое отклонение (%) выходного напряжения.

**OVERCURRENT DEVICE (УСТРОЙСТВО  
ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ)**

Устройство, автоматически размыкающее цепь согласно предустановленным условиям (перегрузки, короткого замыкания), либо с помощью плавкой вставки или электромеханическим способом.

**OVERCURRENT PROTECTION  
(ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ)**

См. OUTPUT CURRENT LIMITING.

**OVERLOAD PROTECTION (ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ)**

Функция детектирования условий перегрузки и выработки реакции на них. См. также CURRENT LIMITING.

**OVERSHOOT (ПЕРЕРЕГУЛИРОВАНИЕ)**

Переходной процесс на выходе источника, выражающийся в чрезмерном уходе за установленные пределы регулирования. Обычно возникает при включении/выключении источника или при скачкообразном изменении сетевого напряжения либо нагрузки.

**OVERVOLTAGE (ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЕ)**

1. Отклонение электродного потенциала от его равновесного значения при поляризации внешним током. 2. Напряжение, превышающее установленный предел.

**OVERVOLTAGE PROTECTION (OVP)  
(ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ [ЗПН])**

Функция детектирования условий высокого напряжения и выработки реакции на него. См. также OVERVOLTAGE, CROWBAR.

**OVP (ЗПН)**

Сокр. защита от перенапряжения.

**Р****PAD (КОНТАКТНАЯ ПЛОЩАДКА)**

Проводящая поверхность на печатной плате, используемая для соединения с выводами радиокомпонентов и элементами разводки, или в качестве контрольной точки.

**PARALLEL (ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ)**

1. Термин, используемый для описания конфигурации источников питания, когда их одноименные выводы соединены таким образом, что их суммарный ток поступает в общую нагрузку. 2. Шунтовое соединение элементов цепи.

**PARALLEL (ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ)**

Соединение двух или нескольких источников одинакового выходного напряжения для получения более высокого выходного тока. Для этого могут потребоваться специальные конструкторские доработки источника.

**PARD (periodic and random deviation)  
(ПЕРИОДИЧЕСКИЕ И ПРОИЗВОЛЬНЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ)**

Заменяет старый термин пульсаций помех. PARD — периодические или произвольные отклонения относительно суммы всех пульсаций и помех постоянного выхода источника питания, независимо от их природы.

**PASS ELEMENT (ПРОХОДНОЙ ЭЛЕМЕНТ)**

Устройство с управляемым сопротивлением, электронная лампа или полупроводник, включенный последовательно с источником питания постоянного тока в целях регулирования (стабилизации).

**PEAK (ПИК)**

Максимальное значение сигнала в течение отдельного цикла или рабочего времени.

**PEAK INVERSE VOLTAGE (PIV)****(МАКСИМАЛЬНОЕ ОБРАТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ [МОИ])**

Максимальное значение напряжения, приложенного в обратном направлении.

**PEAK OUTPUT CURRENT  
(МАКСИМАЛЬНЫЙ ВЫХОДНОЙ ТОК)**

Максимальное значение тока, поступающее в нагрузку при заданном импульсном режиме.

**PEAK-TO-PEAK (ПОЛНЫЙ РАЗМАХ)**

Величина сигнала, отсчитанная от положительного до отрицательного максимума.

**PERIODIC AND RANDOM DEVIATION (PARD)  
(ПЕРИОДИЧЕСКОЕ И СЛУЧАЙНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ)**

Совокупность всех пульсаций и шумов, измеренная в заданной полосе частот и выраженная (если не оговорено другое) в терминах полного размаха (peak-to-peak).

**PHASE ANGLE (ФАЗОВЫЙ УГОЛ)**

Угол, на который напряжение сигнала опережает ток или отстает от него.

**PIV (МОИ)**

Максимальное обратное напряжение.

**POLARITY (ПОЛЯРНОСТЬ)**

Свойство устройства или цепи, заключающееся в наличии полюсов — южного и северного, или положительного и отрицательного.

**POSITIVE RAIL (ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ ШИНА)**

Один из двух выходных проводников источника питания, потенциал которого выше.

**POST REGULATION (ВТОРИЧНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ)**

Установка дополнительного стабилизатора на выходе источника питания для повышения качества стабилизации и снижения пульсаций и шумов.

**POT (ПОТ)**

Сокр. потенциометр.

**POTTING (КОМПАУНД)**

Изоляционный материал для заливки (герметизации) элементов цепи.

**POWER FACTOR (КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ)**

Десятичное отношение истинной мощности к кажущейся; часто указывается в терминах запаздывания или опережения (фазового) тока относительно напряжения.

**POWER FACTOR CORRECTION (КОРРЕКЦИЯ  
КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ)**

1. Метод интенсификации отбора тока для достижения его синфазности с напряжением в цепях переменного тока. 2. Добавление конденсатора в цепь с индуктивным импедансом для изменения реактивного сопротивления.

**POWER RATING (НОМИНАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ)**

Величина мощности на выходе источника, указанная в спецификации завода-изготовителя.



**POWER SOURCE (ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ)**

Устройство, поставляющее электроэнергию: генератор, электрохимический элемент, батарея, блок питания, источник питания, солнечный элемент.

**POWER SUPPLY (ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ)**

Устройство, обеспечивающее преобразования электроэнергии таким образом, чтобы ее выходные параметры удовлетворяли заданным условиям. Типовое применение источника питания: преобразование входной «сырьевой» мощности в регулируемое и стабилизированное напряжение (ток), необходимое для работы электронной аппаратуры.

**POWER SUPPLY CORD (ШНУР ПИТАНИЯ)**

Конструкция достаточной длины из гибкого электрошнура с разветвительным штепселем на конце.

**PPM**

Сокр. количество частей на миллион ( $\times 10^{-6}$ ).

**PREREGULATION (ПРЕДСТАБИЛИЗАЦИЯ)**

Первичный каскад цепи стабилизации в системе, содержащей не менее двух контуров стабилизации.

**PRIMARY-SIDE-CONTROL  
(УПРАВЛЕНИЕ ПО ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКЕ)**

Наименование резервного источника питания с широтно-импульсным модулятором со стороны первичной обмотки.

**PRIMARY CIRCUIT (ПЕРВИЧНАЯ ЦЕПЬ)**

Цепь устройства, электрически подсоединенная к источнику мощности.

**PROGRAMMABLE COEFFICIENT  
(КОЭФФИЦИЕНТ УПРАВЛЕНИЯ)**

Изменение управляющего сопротивления, требуемое для изменения выходного напряжения на 1 В. Выражается в Ом/В. Или: изменение управляющего параметра, необходимое для приращения выходного параметра на единицу измерения, например 100 Ом/В, 100 Ом/А.

**PROGRAMMABLE POWER SUPPLY  
(УПРАВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ)**

Источник питания, управляемый с помощью внешнего напряжения, тока, сопротивления или цифрового кода.

**PROGRAMMING (УПРАВЛЕНИЕ)**

Управление параметрами источника питания (выходным напряжением) посредством сигналов или органов управления.

**PULSE-WIDTH MODULATION (PWM)  
(ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ [ШИМ])**

Метод стабилизации выходного напряжения в импульсном источнике питания путем изменения длительности входных импульсов при постоянной частоте их следования на входе ключевого каскада.

**PULSE-WIDTH MODULATOR (PWM)  
(ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ МОДУЛЯТОР [ШИМ])**

В коммутационных источниках питания ИС с малой степенью интеграции, используемая для управления временем передачи импульсов, сгенерированных часами.

**PUSH-PULL CIRCUIT (ДВУХТАКТНЫЙ КАСКАД)**

Цепь из двух одинаковых элементов, работающих в противофазе. Применяется в случаях, когда требуется создать выход с дополнительными параметрами или устранить нежелательные (стандарт IEEE Std 100-1988).

**PUSH-PULL CONVERTER (ДВУХТАКТНЫЙ КОНВЕРТЕР)**

Мощная импульсная схема, содержащая не менее двух ключевых каскадов, работающих попеременно.

**PWM (ШИМ)**

Сокр. широтно-импульсная модуляция, широтно-импульсный модулятор.

**R****RATED OUTPUT CURRENT (НОМИНАЛЬНЫЙ  
ВЫХОДНОЙ ТОК)**

Максимальный выходной ток, на который рассчитан источник питания согласно заводской спецификации.

**RECOVERY TIME (ВРЕМЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ)**

Время, требуемое для возврата параметра в установленные пределы в аномальной ситуации.

**RECTIFICATION (ВЫПРЯМЛЕНИЕ)**

Процесс преобразования переменного тока в ток одного направления. См. FULL-WAVE RECTIFIER, HALF-WAVE RECTIFIER.

**RECTIFIER (ВЫПРЯМИТЕЛЬ)**

Элемент, пропускающий ток только в одном направлении, например диод.

**REFERENCE GROUND (БАЗОВОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ)**

Точка в цепи (системе), относительно которой отсчитываются все потенциалы.

**REFERENCE VOLTAGE (ОПОРНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ)**

Напряжение, с которым сравниваются все остальные напряжения.

**REGULATED POWER SUPPLY (СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ  
ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ)**

Устройство, поддерживающее в установленных пределах постоянство выходного напряжения (тока), при заданных параметрах изменчивости сети, температуры нагрузки или времени.

**REGULATION (СТАБИЛИЗАЦИЯ)**

Процесс поддержания параметров на постоянном уровне; степень стабилизации выражается в процентах.

**REGULATOR (СТАБИЛИЗАТОР)**

Цепь источника питания, регулирующая или стабилизирующая выходной параметр на заданном уровне.

**REMOTE CONTROL (ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ)**

1. (общ.) Управление операциями на расстоянии, включая установление связей между устройствами. Примечание: Д.У. можно организовать непосредственно по проводам постоянным током (А), с использованием других каналов связи ВЧ или СВЧ (В), по методу диспетчерского контроля (Г) или же механическим способом (Д). 2. (телемеханика) Метод управления устройством через его интерфейсное соединение в целях исполнения устройством различных задач (стандарт IEEE Std 100-1988).

**REMOTE PROGRAMMING (ДИСТАНЦИОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ)**

См. PROGRAMMING.

**REMOTE SENSING (ДИСТАНЦИОННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ)**

Метод стабилизации выходного напряжения в нагрузке путем непосредственного включения в нее чувствительного элемента - детектора ошибки. Дистанционное детектирование построено по принципу компенсации заданного максимального падения напряжения в чувствительном элементе. Следует избегать размыкания рабочих выводов нагрузки, чтобы не повредить источник питания. Во избежание повреждения системы необходимо соблюдать полярность подключения чувствительных элементов.

**REPEATABILITY (ПОВТОРЯЕМОСТЬ)**

Способность воспроизводить результаты в идентичных рабочих условиях.

**RESET SIGNAL (СИГНАЛ СБРОСА)**

Сигнал возврата цепи в требуемое состояние.

**RESISTANCE (R) (СОПРОТИВЛЕНИЕ [R])**

Свойство материала оказывать сопротивление протекающему току.

**RESOLUTION (РАЗРЕШЕНИЕ)**

Наименьший шаг изменения выходного параметра, реализуемый посредством регулирующих органов.

**RESONANCE (РЕЗОНАНС)**

1. Состояние, при котором частота свободных колебаний цепи совпадает с частотой приложенного сигнала, или если последняя вызывает интенсивную реакцию цепи. 2. Состояние, при котором частота свободных колебаний тела совпадает с частотой приложенной силы, или если последняя вызывает интенсивную вибрацию тела.

**RESONANT CIRCUIT (РЕЗОНАНСНАЯ ЦЕПЬ)**

Цепь, в которой индуктивный и емкостной элементы находятся в резонансе на рабочей частоте.

**RESONANT CONVERTER (РЕЗОНАНСНЫЙ КОНВЕРТЕР)**

Тип конвертера, в котором резонансная цепь является частью контура стабилизации.

**RESONANT FREQUENCY (РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА)**

Частота свободных колебаний цепи или вибратора. При резонансе в LC-цепи индуктивная и емкостная реактивности совпадают по абсолютной величине.

**RESPONSE TIME (ВРЕМЯ ОТКЛИКА)**

Время приращения выходного параметра источника на заданную величину при подаче ступенчатого или иного возмущения.

**RETURN (ВОЗВРАТНАЯ КЛЕММА)**

Наименование общего вывода источника питания, к которому идет обратный ток.

**REVERSE VOLTAGE PROTECTION (ЗАЩИТА ОТ ОБРАТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ)**

Цепь или элемент, защищающий источник от повреждения при подаче обратного напряжения на его вход или выход.

**RFI (РЧП)**

Радиочастотные помехи.

**RIDE-THROUGH (ВРЕМЯ ПОДДЕРЖАНИЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ)**

См. HOLDUP TIME.

**RIPPLE (ПУЛЬСАЦИЯ)**

Периодическая составляющая выхода источника, гармонически связанная с входным напряжением или частотой коммутации. В общем случае выражается в единицах peak-to-peak с указанием полосы частот.

**RIPPLE AND NOISE (ПУЛЬСАЦИИ И ШУМЫ)**

См. PERIODIC и RANDOM DEVIATION (PARD).

**RIPPLE VOLTAGE (НАПРЯЖЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ)**

Периодическая составляющая напряжения на выходе источника питания постоянного тока.

**RISE TIME (ВРЕМЯ НАРАСТАНИЯ)**

Время, в течение которого импульс нарастает от 10 до 90 % его максимальной амплитуды.

**RMS VALUE (СР. КВ. ЗНАЧЕНИЕ)**

В тексте используется написание строчными буквами: rms (ср. кв.). Сокр. для «среднее квадратическое значение».

**ROOT MEAN SQUARE (RMS) VALUE (СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ [СР. КВ.])**

1. (периодическая функция) Квадратный корень из среднего арифметического квадратов значений функции, взятых за ее период (стандарт IEEE Std 100-1988). 2. Для синусоидального сигнала:  $0,707 \times \text{макс. значение}$ .

## S

**SAFE OPERATING AREA (SOA) (РЕЖИМЫ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ)**

Предписанные производителем энергетические и временные соотношения, которые необходимо соблюдать во избежание выхода из строя мощных биполярных транзисторов.

**SAFETY COMPLIANCE****(СООТВЕТСТВИЕ УСЛОВИЯМ БЕЗОПАСНОСТИ)**

Сертификация, санкция или подтверждение соответствующим ведомством по безопасности, например, Underwriters Laboratories Inc. (UL/U.S.A.), Canadian Standards Association (CSA) и др. См. также: COMPLIANCE.

**SAFETY GROUND (ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ)**

Проводящая шина, соединяющая шасси, панель или корпус с землей; устанавливается в целях предотвращения телесных повреждений и порчи аппаратуры.

**SCR (ТРИНИСТОР)**

Сокр. кремниевый управляемый диод.

**SECONDARY CIRCUIT (ВТОРИЧНАЯ ЦЕПЬ)**

Цепь, электрически развязанная от входа источника энергии.

**SECONDARY OUTPUT (ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ВЫХОД)**

Выход импульсного источника питания, не охваченный контуром стабилизации.

**SENSE AMPLIFIER (УСИЛИТЕЛЬ-ДЕТЕКТОР)**

Усилитель, снимающий сигнал с делителя выходного напряжения; предназначен для измерения или детектирования величины выходного напряжения (Bertan High Voltage).

**SENSE LINE (ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ)**

Проводник, по которому выходное напряжение поступает в контур стабилизации. См. также REMOTE SENSING.

**SENSE LINE RETURN (ОБРАТНЫЙ ПРОВОД ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ)**

Проводник, соединяющий обратный вывод источника с контуром стабилизации. См. также: REMOTE SENSING.

**SEQUENCING (ЗАДАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ)**

Процесс, устанавливающий порядок включения/выключения отдельных выходов многоканального источника питания.

**SERIES (ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ)**

1. Способ соединения двух или нескольких источников питания, при котором объединяются их разноименные выводы в целях получения суммарного напряжения в нагрузке.
2. Соединение элементов в непрерывную цепь.

**SERIES PASS (ПРОХОДНОЙ ЭЛЕМЕНТ)**

Управляемый активный элемент, включенный последовательно с нагрузкой; используется для регулировки напряжения.

**SERIES REGULATOR (ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР)**

Стабилизатор, в котором управляющий активный элемент включен последовательно с источником питания и нагрузкой.

**SERIES REGULATION (ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ)**

См. LINEAR REGULATION.

**SETTING RANGE (ДИАПАЗОН РЕГУЛИРОВАНИЯ)**

Диапазон, в котором регулируются выходные параметры стабилизации.

**SETTING TIME (ВРЕМЯ УСТАНОВЛЕНИЯ)**

Время, в течение которого выход источника стабилизируется после его выхода за установленные пределы.

**SHIELD (ЭКРАН)**

Перегородка или кожух вокруг элемента цепи, установленный в целях минимизации влияния паразитных магнитных и электрических полей. См. также ENCLOSURE, ELECTROSTATIC SHIELD, FARADAY SHIELD.

**SHOCK HAZARD (ОПАСНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ ТОКОМ)**

Потенциально опасная электрическая ситуация, определяемая в соответствии с промышленными и ведомственными спецификациями.

**SHORT CIRCUIT (КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ)**

Электрическое соединение, в результате которого образуется участок с практически нулевым сопротивлением.

**SHORT CIRCUIT (КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ)**

Начальное значение тока, полученное при замыкании выхода источника питания на цепь с пренебрежительно малым сопротивлением.

**SHORT CIRCUIT PROTECTION (ЗАЩИТА ОТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ)**

Защитная функция, ограничивающая выходной ток источника питания в целях предотвращения его повреждения.

**SHORT CIRCUIT TEST (ТЕСТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ)**

Испытание, в ходе которого выход закорачивается с целью выяснить, находится ли ток короткого замыкания в установленных пределах.

**SHUNT (ШУНТ)**

1. Параллельный токопроводящий элемент в цепи.
2. Прецизионный резистор небольшой величины, используемый для контроля тока.

**SHUNT REGULATOR (ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР)**

Линейный стабилизатор, в котором управляющий элемент включен параллельно нагрузке и последовательно с импедансом в целях обеспечения постоянства напряжения в нагрузке.

**SI (СИ)**

Сокр. Международная система единиц, СИ.

**SIGNAL GROUND (СИГНАЛЬНАЯ ЗЕМЛЯ)**

Общая или опорная точка цепи аналогового сигнала.

**SINE WAVE (СИНУСОИДАЛЬНЫЙ СИГНАЛ)**

Сигнал переменного тока одной частоты, в котором смещение является функцией синуса от угла, пропорционального времени или расстоянию.

**SLAVE (ВЕДОМОЕ УСТРОЙСТВО)**

Источник питания, работающий под управлением опорного источника (ведущего).

**SLEW RATE (СКОРОСТЬ НАРАСТАНИЯ)**

Максимальная скорость изменения выхода источника

питания при подаче на его вход ступенчатого (или иного) воздействия. Источник питания должен находиться во включенном состоянии.

**SLOW START (ПЛАВНЫЙ ПУСК)**

Функция, обеспечивающая плавный управляемый рост выходного напряжения с защитой ключевых транзисторов от выбросов в момент включения источника.

**SNUBBER (ДЕМПФЕР)**

RC-цепь, уменьшающая скорость нарастания напряжения при переключениях.

**SOA (ЗУР)**

Зона устойчивой работы.

**SOFT STARTS (МЯГКИЙ ПУСК)**

Управление процессом включения для снижения бросков тока.

**SOURCE (ИСТОЧНИК)**

Источник входной электроэнергии — генератор, электросеть, батарея и др.

**SOURCE VOLTAGE EFFECT (НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ПО ВХОДУ)**

Изменение стабилизированного выхода, обусловленное заданным изменением входного напряжения.

**STABILITY (СТАБИЛЬНОСТЬ)**

1. Изменение (в процентах) выходного параметра в зависимости от времени, регистрируемое после заданного времени прогрева при постоянных остальных параметрах источника.
2. Способность удерживать заданную частоту или оставаться в данном состоянии без нежелательных флуктуаций.

**STANDOFF (ПОДВЕСКА)**

Механическая поддержка (например, изолятор) для подключения и удержания провода или устройства на некотором расстоянии от несущей поверхности.

**STEP-DOWN TRANSFORMER (ПОНИЖАЮЩИЙ ТРАНСФОРМАТОР)**

(силовой и распределительный трансформаторы) Трансформатор, в котором происходит преобразование напряжения с более высокого на низкое (стандарт IEEE Std 100-1988).

**STEP-UP TRANSFORMER (ПОВЫШАЮЩИЙ ТРАНСФОРМАТОР)**

(силовой и распределительный трансформаторы) Трансформатор, в котором происходит преобразование напряжения с низкого на более высокое (стандарт IEEE Std 100-1988).

**STORAGE TEMPERATURE (ТЕМПЕРАТУРА ХРАНЕНИЯ)**

Диапазон температур, в пределах которого источник питания может храниться на складе без снижения своих качеств в последующей эксплуатации. См. также: AMBIENT TEMPERATURE, OPERATING TEMPERATURE.

**SUMMING POINT (ТОЧКА СУММИРОВАНИЯ)**

Точка, в которой происходит алгебраическое суммирование двух или нескольких входов операционного усилителя.

**SWITCHING FREQUENCY (ЧАСТОТА КОММУТАЦИИ)**

Частота переключения постоянного напряжения в конвертере или источнике питания.

**SWITCHING REGULATOR (ИМПУЛЬСНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР)**

Ключевая схема, работающая совместно с замкнутым контуром регулирования в целях стабилизации выхода источника питания.

**SYNCHRONOUS RECTIFICATION (СИНХРОННОЕ ВЫПРЯМЛЕНИЕ)**

Выпрямительная схема в импульсном источнике питания, в которой для повышения эффективности вместо выпрямительного диода применен полевой или биполярный транзистор.

**SYSTEME INTERNATIONAL d'UNITES (SI) (МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ [СИ])**

Система единиц измерения, включающая базовые, дополнительные и производные единицы.

## T

**TRANSIENT RESPONSE TIME (ВРЕМЯ ПЕРЕХОДНОГО ОТКЛИКА)**

Интервал времени от начала переходного отклика до момента, когда он затухает, оставаясь в заданных амплитудных пределах.

**TEMPERATURE COEFFICIENT (ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ)**

Среднее изменение (в процентах) выходного напряжения на градус Цельсия окружающей среды в заданном диапазоне температур. См. также AMBIENT TEMPERATURE.

**TEMPERATURE DERATING (ТЕМПЕРАТУРНЫЙ УХОД НОМИНАЛОВ)**

Величины, на которые уменьшаются значения номинальных параметров источника или элементов в целях обеспечения работы при повышенной температуре.

**TEMPERATURE EFFECT (ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ)**

См. TEMPERATURE COEFFICIENT.

**TEMPERATURE RANGE, OPERATING (ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН, РАБОЧИЙ)**

См. OPERATING TEMPERATURE RANGE.

**THERMAL PROTECTION (ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА)**

Защитная функция, отключающая источник, если его внутренняя температура превышает предустановленный предел.

**THREE TERMINAL REGULATOR (СТАБИЛИЗАТОР С ТРЕМЯ ВЫВОДАМИ)**

Силовая ИС в стандартном транзисторном корпусе с тремя выводами. В зависимости от типа, ИС может выполнять функции последовательного или параллельного стабилизатора.

**TIME CONSTANT (ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ)**

Интервал времени, в течение которого напряжение на конденсаторе в RC-цепи возрастает (снижается) до уровня 63,2 % (36,7 %) от максимального значения.

**TOLERANCE (ДОПУСК)**

Измеренное или заданное отклонение (в процентах) величины от ее номинального значения.

**TOTAL EFFECT (СУММАРНЫЙ ЭФФЕКТ)**

Изменение стабилизированного выхода в наихудших условиях изменчивости всех влияющих свойств в пределах их номинальных диапазонов.

**TRACE (ДОРОЖКА)**

Проводящий отрезок печатной платы.

**TRACKING (ТРЭКИНГ)**

Характеристика многоканального источника питания, определяющая изменчивость напряжения на одном выходе в зависимости от изменения напряжения или тока на другом выходе.

**TRACKING REGULATOR (СЛЕДЯЩИЙ СТАБИЛИЗАТОР)**

Источник питания с двумя выходами, из которых один отслеживает другой.

**TRANSIENT (ПЕРЕХОД)**

Отклонение данного параметра, обычно связанное с изменчивостью входного сигнала или нагрузки.

**TRANSIENT EFFECT  
(ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА)**

Результат пошагового количественного изменения влияющих стационарных величин цепи.

**TRANSIENT RECOVERY TIME  
(ВРЕМЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА)**

Интервал времени, за который выходное напряжение источника питания достигает установившегося уровня в пределах заданной погрешности.

**TRANSIENT RESPONSE (ПЕРЕХОДНОЙ ОТКЛИК)**

Реакция цепи на внезапное изменение входных или выходных параметров.

**TRANSIENT RESPONSE TIME  
(ВРЕМЯ ПЕРЕХОДНОГО ОТКЛИКА)**

Интервал времени от начала переходного отклика до момента, когда он затухает, оставаясь в заданных амплитудных пределах.

**TTL (ТТЛ)**

Сокр. транзисторно-транзисторная логика.

**U****UL (Underwriters Laboratories Incorporated)**

Сокр. компания, занимающаяся сертификацией изделий с точки зрения их безопасности.

**UNDERSHOOT (НЕДОРЕГУЛИРОВАНИЕ)**

Переходное изменение выходного напряжения, величина которого ниже допустимого уровня точности. См. OVERSHOOT.

**UNDERVOLTAGE PROTECTION (ЗАЩИТА  
ОТ ПОНИЖЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ)**

Цепь, уменьшающая электроснабжение, если напряжение на выходе падает ниже заданного минимального уровня.

**UNDERWRITERS LABORATORIES INCORPORATED (UL)**

Компания США, уполномоченная проводить испытания и давать оценку качества изделий, в том числе источников питания. Имеет четыре филиала, и заявитель может выбрать ближайший.

**UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY (UPS)  
(ИСТОЧНИК БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ [ИБП])**

Источник питания, предназначенный для резервного питания нагрузки, когда сетевое напряжение выходит за допустимые пределы. См. также: OFF LINE POWER SUPPLY, ON LINE POWER SUPPLY.

**UPS (ИБП)**

Сокр. источник бесперебойного питания.

**V****VARISTOR (ВАРИСТОР)**

Двухэлектродный полупроводниковый прибор, имеющий нелинейную зависимость сопротивления от напряжения.

VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker)

Сокр. Союз немецких электротехников.

**VOLTAGE DIVIDER (ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ)**

Секционированное или последовательное сопротивление (импеданс) на выходе источника для получения нескольких напряжений.

**VOLTAGE DOUBLER (УДВОИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ)**

См. VOLTAGE MULTIPLIER.

**VOLTAGE DROP (ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ)**

Разность потенциалов между двумя точками пассивного элемента или цепи.

**VOLTAGE LIMIT (ПРЕДЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ)**

Максимальное или минимальное значение в диапазоне напряжений.

**VOLTAGE LIMITING (ОГРАНИЧИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ)**

Ограничивающая цепь, предназначенная для установления максимальных или минимальных значений напряжения.

**VOLTAGE MODE (РЕЖИМ  
СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ)**

Режим работы источника питания при стабилизированном выходном напряжении.

**VOLTAGE MONITOR (КОНТРОЛЛЕР НАПРЯЖЕНИЯ)**

Цепь или прибор, фиксирующий факт напряжения в заданных пределах.

**VOLTAGE MULTIPLIER (УМНОЖИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ)**

Выпрямительная цепь, выходное напряжение которой превышает напряжение на ее входе. Типовые умножители имеют коэффициент кратности напряжения 2, 3 или 4.

**VOLTAGE REGULATION (СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ)**

Процесс поддержания напряжения на постоянном уровне между двумя установленными значениями. Степень стабилизации выражается в процентах. См. также REGULATION.

**VOLTAGE SOURCE (ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ)**

Источник электроэнергии, вырабатывающий постоянное напряжение.

**VOLTAGE STABILIZATION (СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ)**

Применение цепи или прибора, поддерживающего выходное напряжение на постоянном уровне в заданных пределах.

**VOLT (V) (ВОЛЬТ [В])**

Единица измерения электродвижущей силы или разности потенциалов. Обозначается символами E (электротехника) или V (полупроводниковая техника).

**W****WARMUP (ПРОГРЕВ)**

Процесс доведения температуры источника до равновесного состояния после его включения.

**WARMUP DRIFT (ДРЕЙФ ПРОГРЕВА)**

Изменение выходного напряжения источника, начиная с момента включения и до установления равновесной температуры при заданных рабочих условиях.

**WARMUP EFFECT (ЭФФЕКТ ПРОГРЕВА)**

Абсолютная величина ухода параметров стабилизированного выхода за время прогрева.

**WARMUP TIME (ВРЕМЯ ПРОГРЕВА)**

Время, которое требуется источнику питания после его включения для выхода на эксплуатационный режим.

**WATT (W) (ВАТТ [ВТ])**

Единица измерения мощности, равная 1 Дж/с ( $W=EI$ ).

**WEBER (Wb) (ВЕБЕР [ВБ])**

Единица измерения магнитного потока, равная 10<sup>8</sup> Мкс. Данное количество потока при его убывании до нуля в течение 1 с создает в одном витке провода эдс, равную 1 В.

**WITHSTAND VOLTAGE****(ВЫДЕРЖИВАЕМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ)**

Рабочее напряжение или диапазон напряжений согласно спецификации на компонент, прибор или элемент питания.

**WORKING VOLTAGE (РАБОЧЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ)**

Рабочее напряжение или диапазон напряжений согласно спецификации на компонент, прибор или элемент питания.

**WORST CASE CONDITION (НАИХУДШИЕ УСЛОВИЯ)**

Комбинация условий, при которых их суммарное воздействие на систему или прибор приносит наибольший ущерб.

**X****X-RAY TUBE (РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА)**

Вакуумный прибор, генерирующий рентгеновский пучок за счет разгона электронов в электростатическом поле и резкого торможения при столкновении с мишенью (стандарт IEEE Std 100-1988).

**Z****ZENER DIODE (ЗЕНЕРОВСКИЙ ДИОД [СТАБИЛИТРОН])**

1. Диод, в котором используется пробойный (туннельный) эффект p-n перехода. При постепенном увеличении обратного напряжения достигается значение, после которого ток резко возрастает, благодаря чему напряжение поддерживается на примерно постоянном уровне. 2. Пробой может быть как низковольтным (туннельный эффект), так и высоковольтным (лавинный пробой).

**ZENER VOLTAGE****(НАПРЯЖЕНИЕ ТУННЕЛЬНОГО ПРОБОЯ)**

Обратное напряжение, при котором наступает пробой в зенеровском диоде.

## А

**ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА**

Отношение энергии, переданной ионизирующим излучением или выделенной его источником, к единице массы облученного материала; выражается в радах или греях.

**ЭФФЕКТИВНЫЙ РАЗМЕР ФОКУСНОГО ПЯТНА**

Область зеркала анода, на которую попадают электроны из рентгеновской трубки.

**КЕРМА В ВОЗДУХЕ**

Мера количества энергии ионизирующего излучения, выраженная в джоулях (Дж) и обозначающая энергию, полученную или поглощенную единицей массы (кг) воздуха. Поэтому керма, будучи количественной единицей, выражается в Дж/кг и совпадает с единицей измерения количества излучения — греем (Гр).

**РЕНТГЕНОГРАФИЯ С ОРГАНОАТОМИЧЕСКИМИ ПРОГРАММАМИ**

Методика, позволяющая использовать консоль с графическими изображениями нормальной анатомии скелета (человека или животного) для помощи технологу в выборе необходимых значений требуемого анодного напряжения и тока путем выбора отдельной части тела (человека или животного), подвергаемой исследованию.

**АНГИОГРАФИЯ**

Процедура флюороскопии, применяемая для визуализации кровеносных сосудов.

**АПЕРТУРА**

Фиксированная коллимация диагностической рентгеновской трубки, например в апертурной диафрагме.

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЯРКОСТЬЮ**

Функция системы флюороскопии, позволяющая радиологу задавать нужный уровень яркости изображения, который далее поддерживается автоматически путем изменения анодного напряжения и (или) тока.

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПОЗИЦИЕЙ**

Реализованная в большинстве рентгенографических систем возможность задавать уровень ионизирующего излучения во время рентгенографии.

## В

**ОБРАТНОЕ РАССЕЯННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

Рентгеновское излучение, отраженное в обратном направлении после взаимодействия с объектом.

**УСТРОЙСТВО ОГРАНИЧЕНИЯ ПУЧКА**

Устройство, позволяющее ограничивать размеры поля рентгеновского излучения.

**РЕШЕТКА СНИМКОВ (БАККИ)**

Бленда Бакки — это устройство, перемещающее решетку при проведении рентгенографии. Перемещение делает свинцовые пластины невидимыми на рентгеновском изображении, снижая шум и повышая разборчивость изображения для диагностики.

## С

**КОЛЛИМАТОР**

Устройство, применяемое для ограничения формы и размеров пучка рентгеновского излучения.

**КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕНТГЕНОГРАФИЯ (КР)**

Метод рентгенографии, в котором в качестве приемника изображения используется фоточувствительный фосфор (фосфор с длительным послесвечением). Полученное изображение затем можно оцифровать, сохранить на компьютере и передать по сети.

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ (КТ)**

Создание томографических срезов тела путем вращения вокруг пациента веерного пучка рентгеновского излучения и массива детекторов и применения технологий компьютерной реконструкции для обработки изображения.

**КОНТРАСТНОСТЬ**

Степень различимости светлых и темных областей рентгеновского снимка.

**КОНТРАСТНОЕ ВЕЩЕСТВО**

Средство, усиливающее различимость анатомических структур.

## D

**СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ (ССД)**

Управляемые компьютером электронный усилитель и коммутационное устройство, в которое поступают сигналы всех детекторов ионизирующего излучения в системе многосрезовой спиральной компьютерной томографии.

**КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ (КЭР)**

Показатель эффективности создания изображения с высоким отношением сигнал/шум рентгенографической системы по сравнению с идеальным детектором.

**МАССИВ ДЕТЕКТОРОВ**

Группа детекторов и промежуточный разделительный материал; приемник изображения в компьютерной томографии.

**ЦИФРОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ И СВЯЗЬ В МЕДИЦИНЕ (DICOM)**

Стандарт, позволяющий осуществлять обмен данными между системами визуализации различных изготовителей.

**ЦИФРОВАЯ ФЛЮОРОСКОПИЯ (ЦФ)**

Цифровая система рентгеновской визуализации, создающая серию динамических изображений посредством направляемого на отдельную область пучка рентгеновского излучения и усилителя изображения или плоскостопанельного детектора.

**ЦИФРОВАЯ РЕНТГЕНОГРАФИЯ (ЦР)**

Цифровой метод создания рентгеновских изображений с помощью цифровых датчиков, в том числе плоскостопанельных детекторов. Их используют вместо обычной фотографической пленки статических рентгенографов.

**ПРОИЗВЕДЕНИЕ ДОЗЫ НА ПЛОЩАДЬ (ПДП)**

Произведение дозы на площадь подвергшейся воздействию поверхности, обычно выражаемое в греях на кв. см (Гр·см<sup>2</sup>). Современные рентгенографические системы оснащаются датчиком ПДП и способны регистрировать получаемые ПДП во время исследования.

**ДОЗИМЕТР**

Инструмент обнаружения ионизирующего излучения и измерения уровня его воздействия.

**Е****ЭФФЕКТИВНЫЙ РАЗМЕР ФОКУСНОГО ПЯТНА**

Область воздействия излучения на пациента и приемник изображения.

**ЭЛЕКТРОНВОЛЬТ (ЭВ)**

Количество энергии, необходимой для переноса электрона между точками с разницей потенциалов в 1 вольт.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ВЫЧИТАНИЕ**

Метод попеременного использования энергий двух пучков рентгеновского излучения с целью получения субтрактивного изображения за счет различий в фотоэлектрическом взаимодействии.

**ЭКСПОЗИЦИЯ**

Мера ионизации, создаваемой в воздухе рентгеновским излучением или гамма-излучением. Количественный показатель интенсивности ионизирующего излучения выражается в рентгенах, кулонах на килограмм или кермах в воздухе.

**Ф****ГЕНЕРАТОР С ПАДАЮЩЕЙ НАГРУЗКОЙ**

Конструкция с автоматическим регулированием коэффициентов экспозиции для достижения максимального значения силы тока (мА) в кратчайшее время экспозиции, допустимое для применяемого генератора высокого напряжения.

**ВЕРНЫЙ ПУЧОК**

Форма пучка рентгеновского излучения в компьютерной томографии, характерная для испускания через щелевое отверстие.

**ФИЛЬТРАЦИЯ**

Удаление низкоэнергетических рентгеновских лучей из полезной части пучка с помощью алюминия или иного металла. Это позволяет повысить качество пучка и уменьшить дозу излучения, получаемую пациентом.

**ФЛЮОРОСКОПИЯ**

Метод медицинской визуализации, обеспечивающий непрерывное получение изображений перемещения внутренних структур, пока на рентгеновскую трубку подается электрический ток. Это позволяет добиться визуализации в реальном времени.

**ФОКУСНОЕ ПЯТНО**

Область зеркала анода, с которой электроны взаимодействуют для создания рентгеновского излучения.

**Г****АНТИРАСSEИВАЮЩАЯ РЕШЕТКА**

Устройство, применяемое для снижения интенсивности рассеянного излучения остаточного пучка рентгеновского излучения.

**СЛОЙ ПОЛОВИННОГО ОСЛАБЛЕНИЯ (СПО)**

Толщина поглотителя рентгеновского излучения, необходимая для снижения интенсивности пучка рентгеновского излучения до половины исходной интенсивности.

**ЖЕСТКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

Рентгеновское излучение с высокой проникающей способностью, которое вследствие этого является высококачественным.

**И****УСИЛИТЕЛЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Электронное устройство, применяемое для создания рентгенографического изображения при малой лучевой экспозиции. Проходящий сквозь пациента пучок рентгеновского излучения попадает в рентгеновскую трубку, где преобразуется в пучок электронов.

**СОБСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ**

Фильтрация полезных пучков рентгеновского излучения, создаваемая фиксированными компонентами корпуса агрегата рентгеновской трубки и стеклянным окном, вставленным в рентгеновскую трубку.

**ОБРАТНОКВАДРАТИЧНЫЙ ЗАКОН**

Закон, согласно которому интенсивность ионизирующего излучения в некоторой области обратно пропорциональна квадрату ее расстояния от источника излучения.

**ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА**

Ионизационная камера — это наиболее простой из всех детекторов ионизирующего излучения с газовым наполнителем. Этот детектор применяется для обнаружения ионизирующего излучения или измерения его уровня.

**К****ПИКОВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ В КИЛОВОЛЬТАХ (КВП)**

Мера максимального электрического потенциала внутри рентгеновской трубки; выражается в киловольтах.

**Л****ИЗЛУЧЕНИЕ УТЕЧКИ**

Вторичное ионизирующее излучение, испускаемое наружу сквозь корпус рентгеновской трубки.

**МАММОГРАФИЯ**

Рентгенографическое исследование женских молочных желез с помощью излучения, создаваемого низким пиковым анодным напряжением.

**МИЛЛИАМПЕР (МА)**

Мера силы тока в рентгеновской трубке.



**МИЛЛИАМПЕР-СЕКUNДА (мА·С)**

Произведение времени экспозиции на силу тока в рентгеновской трубке.

**ПОДВИЖНЫЙ РАСТР**

Решетка, перемещаемая во время облучения рентгеновскими лучами. Обычно применяется в бленде Букки.

**МНОГОСЛОЙНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ**

Метод медицинской визуализации, в котором применяются два массива детекторов для одновременного создания двух спиральных слайсов.

**О****АФОКАЛЬНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

Рентгеновское излучение, возникающее на аноде рентгеновской трубки, но вне фокального пятна.

**РАССТОЯНИЕ «ОБЪЕКТ — ПРИЕМНИК ИЗОБРАЖЕНИЯ» (РОП)**

Расстояние от приемника изображения до объекта, изображение которого необходимо получить.

**Р****ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ**

Явление испускания электронов различными материалами (например, металлами) при бомбардировке фотонами.

**ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ (ФЭУ)**

Электронно-лучевая трубка, преобразующая видимый свет в электрический сигнал.

**ФОТОН**

Электромагнитное излучение, не обладающее массой или электрическим зарядом, но взаимодействующее с материей как частица; рентгеновское излучение и гамма-излучение.

**Q****КВАНТ**

Фотон рентгеновского излучения.

**R****ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальная единица измерения поглощенной дозы и кермы в воздухе. 1 Рад = 100 эрг/г = 0,01 Гр.

**КАЧЕСТВО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Сравнительная проникающая способность пучка рентгеновского излучения, определяемая его средней энергией; как правило, измеряется в слое половинного ослабления или с помощью пикового напряжения в киловольтах.

**МЕТОД РЕНТГЕНОГРАФИИ**

Сочетание параметров, выбранных с помощью панели управления рентгенографической системой визуализации, позволяющее создавать высококачественное изображение на рентгенографе.

**РЕНТГЕНОГРАФИЯ**

Метод медицинской визуализации, в котором для создания фиксированных (статичных) изображений применяется рентгеночувствительная пленка и (или) датчики, а также, как правило, рентгеновская трубка.

**S****РАССЕЯННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

Рентгеновское излучение, рассеиваемое в направлении, обратном направлению падающего пучка рентгеновского излучения.

**МЯГКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

Рентгеновское излучение с низкой проникающей способностью, которое вследствие этого является низкокачественным.

**РАССТОЯНИЕ «ИСТОЧНИК — ПРИЕМНИК ИЗОБРАЖЕНИЯ» (ИПИ)**

Расстояние от рентгеновской трубки до приемника изображения.

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ**

Возможность фиксации на изображении объектов малого размера, имеющих низкую контрастность.

**СТАРТЕР (СТАРТЕР ТРУБКИ)**

В рентгеновских трубках с вращающимся анодом для вращения узла анода применяется асинхронный электродвигатель. Стартер или контроллер (привод) мотора используется для подачи электропитания на двигатель рентгеновской трубки с целью вращения анода.

**T****ТОМОГРАФИЯ**

Томографический снимок тела, получаемый путем перемещения источника рентгеновского излучения и пленки в противоположных направлениях во время экспозиции. Расположенные в фокальной плоскости структуры имеют повышенную резкость, в то время как структуры в других плоскостях выглядят размытыми.

**ОБЩАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ**

Собственная фильтрация рентгеновской трубки вместе с дополнительной фильтрацией.

**X****РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

Проникающее ионизирующее электромагнитное излучение с намного более короткой длиной волны, чем у видимого света.

**Spellman USA and Corporate HQ**

475 Wireless Blvd.  
Hauppauge, NY 11788  
United States  
tel: +1 631-630-3000  
fax: +1 631-435-1620  
email: sales@spellmanhv.com

**Spellman Valhalla NY USA**

One Commerce Park  
Valhalla, NY 10595  
United States  
tel: +1 914-686-3600  
fax: +1 914-686-5424

**Spellman UK**

Broomers Hill Park #14, Broomers Hill  
Pulborough, West Sussex,  
United Kingdom RH20 2RY  
tel: +44 (0) 1798 877000  
fax: +44 (0) 1798 872479

**Spellman Japan**

Kano Bldg. 5F, 1-26-7 Nishigotanda,  
Shinagawa-ku, Tokyo 141-0031 Japan  
tel: +81 (0) 3-5436-9810  
fax: +81 (0) 3-5436-9811

**Spellman China**

Spellman High Voltage Electronics (SIP) Co Ltd.  
Block D, No.16 SuTong Road,  
Suzhou Industrial Park 215021 China  
tel: +86 512-67630010  
fax: +86 512-67630030

**Spellman High Voltage Korea Co.,Ltd.**

#B-720, BRC Smart Valley,  
Song Do Mirae-ro 30,  
Yeonsu-Gu, Incheon, Korea 406-081  
tel: +82 32-719-2300  
fax: +82 32-720-4300

**Spellman de Mexico – Plant 2**

Avenida Pedregal # 2 Esquina  
Avenida Chapultepec  
Parque Industrial FINSA Oriente  
Matamoros, Tamps., Mexico 87340  
tel. +52 868 150-1200

**Spellman de Mexico – Plant 3**

Avenida Chapultepec # 101 Esquina  
Avenida Horizonte  
Parque Industrial FINSA Oriente  
Matamoros, Tamps., Mexico 87340  
tel. +52 868 150-1200

**Spellman High Voltage GmbH**

Josef-Baumann-Straße 23  
44805 Bochum  
Germany  
tel: +49 (0) 234 87906-0  
fax: +49 (0) 234 87906-11

**Spellman Россия**

Северное шоссе 10, офис 221, Раменское  
Московская область, Россия, 140105  
Тел.: +7 (496) 465-92-40  
Факс: +7 (496) 465-92-41  
E-mail: sales@spellmanhv.ru



www.spellmanhv.com  
e-mail: sales@spellmanhv.com