

Высоковольтный источник питания большой мощности для применений с импульсами большой длительности

Алекс Покрываило (Alex Pokryvailo), старший член ИИЭР,
Костел Карп (Costel Carp), и Клифф Скапеллати (Cliff Scapellati)

Краткое изложение: 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 энергетике 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 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. Свойственное 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.

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. ^{+10%}/_{-14%};
- 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.

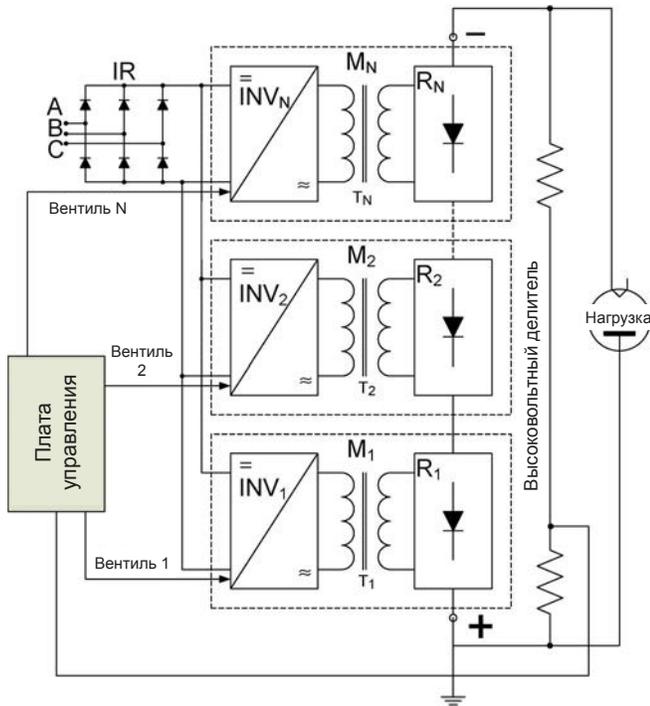


Рис 1. Структурная схема высоковольтного источника питания

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 «индуктивный сумматор». 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

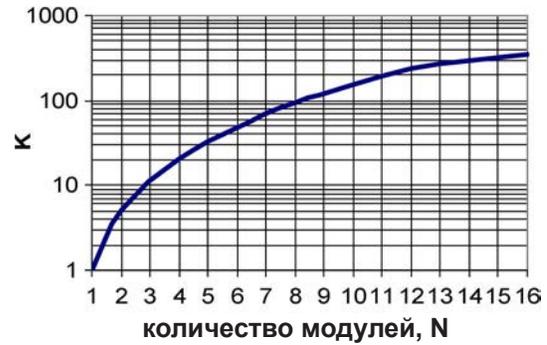


Рис 2. Коэффициент подавления пульсаций

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.

А. 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 или представить в процентах от составляющей постоянного тока. Ради простоты здесь примем, что выпрямленное напряжение модуля представлено наложением составляющей постоянного тока и абсолютной величины 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 пульсация определяется, например, функцией $v(t) = -t + \text{ceil}(t)$, $\alpha = 1$ и $\beta = 1$ (это утверждение можно также легко проверить графически).

Если коэффициент пульсаций задан, сдвиг фаз дает снижение выходной емкости, запасаемой энергии и времени нарастания приблизительно от N до N^2 . Поэтому описанная многоступенчатая 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

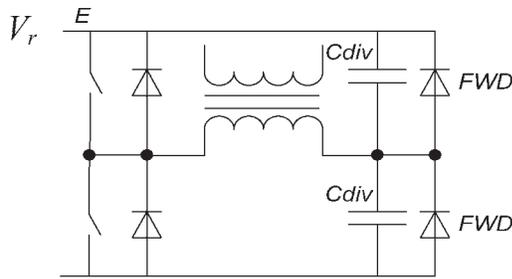


Рис 3. Полумостовой инвертор с конденсаторами дозирования энергии. V_r означает напряжение питания шины постоянного тока

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].

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

А. 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. Высокопрецизионный делитель Spellman (модель HVD100 [18]) служил для измерений высокого напряжения постоянного тока. Модифицированная и снабженная компенсацией калиброванная версия, имеющая обозначение HVD100С, 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 Voltech, модель РМ300. Контроль температуры осуществляется с помощью термодпар, соединенных с регистратором данных (Agilent, модель 34970А) 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 питания 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 IR.

В. Испытания отдельного модуля

Типичные формы колебаний, показанные на рис. 4, указывают на хорошую резонансную коммутацию без токов перерегулирования 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

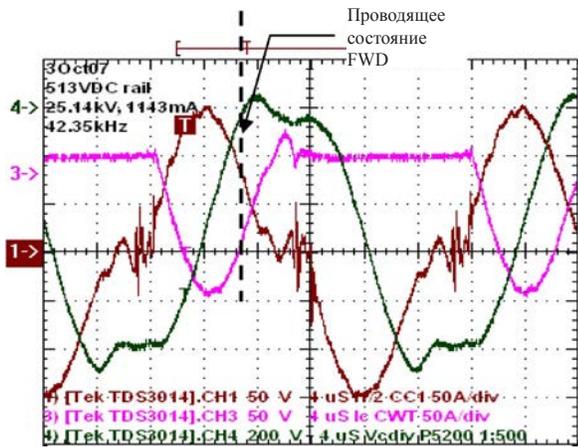


Рис 4. Номинальное линейное напряжение $P = 28,7$ кВт (Развертка 1) ток первичной обмотки (разделен надвое). (Развертка 3) ток коллектора (разделен надвое). (Развертка 4) напряжение на резонансных конденсаторах. Проводящее состояние FWD вправо от пунктирной линии

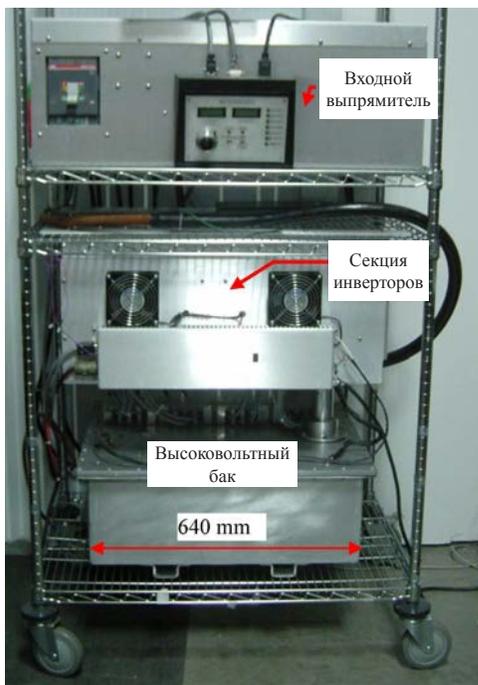


Рис 5. Лабораторные высоковольтные источники питания

относительно окружающего воздуха. Методы измерений потерь мощности и вычисления подробно изложены в [20].

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.

С. 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 маслонаполненный высоковольтный бак. Последний имеет массу 109 кг и содержит не больше 60 л масла.

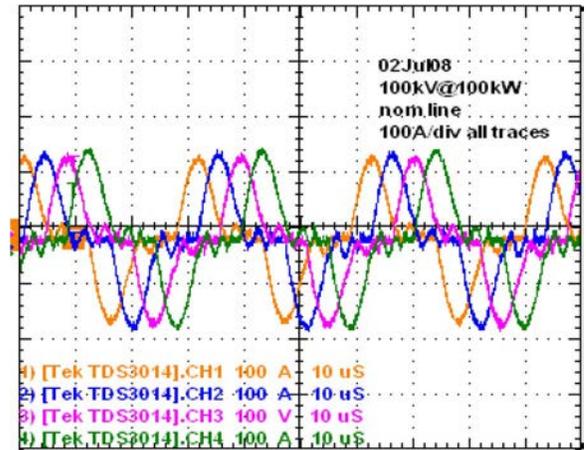


Рис. 6. Сдвинутые по фазе на $\pi/4$ токи первичной обмотки (разделены надвое) при 100 кВ и 100 киловатт. Номинальное линейное напряжение: 400 В пер.

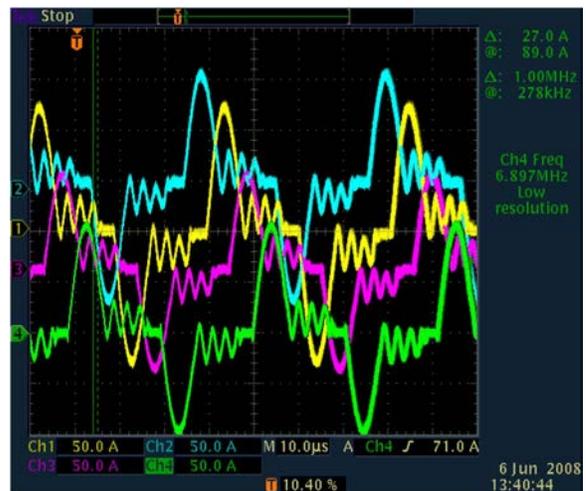


Рис 7. То же, что на рис. 6, при 100 кВ и 50 киловатт. Низкое линейное напряжение: 400 В пер. -14 % (345 В пер.)

Отметим, что в этой статье основное внимание уделено части преобразователя; оптимизация линейного выпрямителя в отношении размера и стоимости не выполнялась.

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.

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). 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

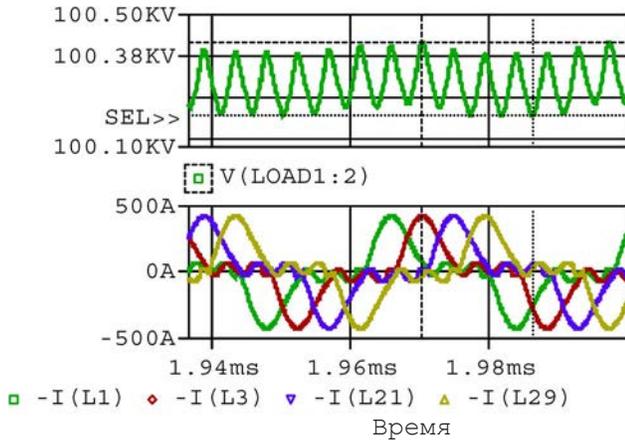


Рис 8. Моделирование высоковольтной цепи. Высокое линейное напряжение $V_r = 580$ В. Пульсация: 0,223 % (размах) PF = 0,943. Экспериментальный PF = 0,946 (см. рис. 11)

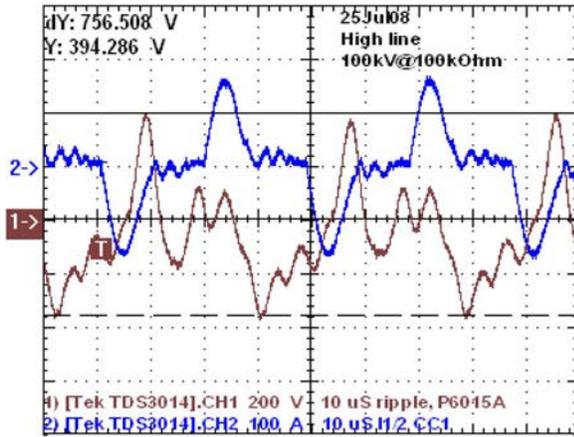


Рис 9. Пульсация при 100 кВ, нагрузка 100 кОм, равна 0,76 % (размах). Высокое линейное напряжение

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 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.

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

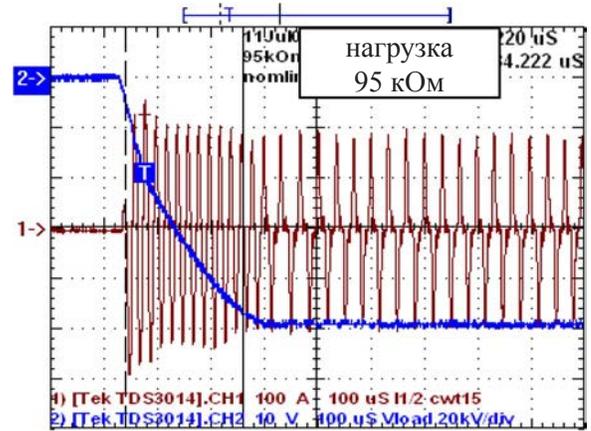


Рис. 10. Время нарастания для нагрузки 95 кОм при номинальном линейном напряжении. (Развертка 2) напряжение нагрузки: 20 кВ/дел. (измерено специальным делителем напряжения с компенсацией). (Развертка 1) ток первичной обмотки (разделен надвое). 100 А/дел.

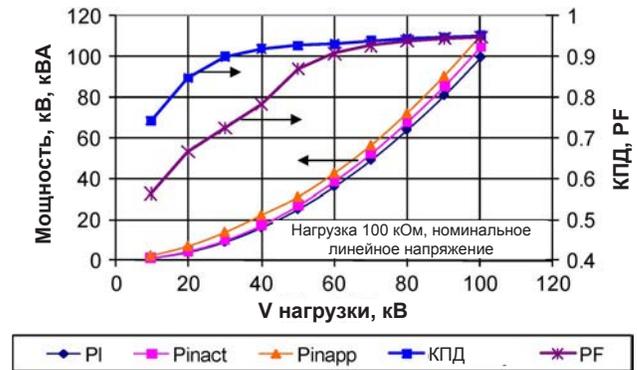


Рис 11. Кажущаяся ($Pinapp$) и активная ($Pinact$) входные мощности, мощность нагрузки (PI), КПД, и PF при номинальном линейном напряжении для нагрузки 100 кОм

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.

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).

Продолжительные измерения при 100 кВ были выполнены вплоть до уровня энергии 100 кВт (средняя продолжительная 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.

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

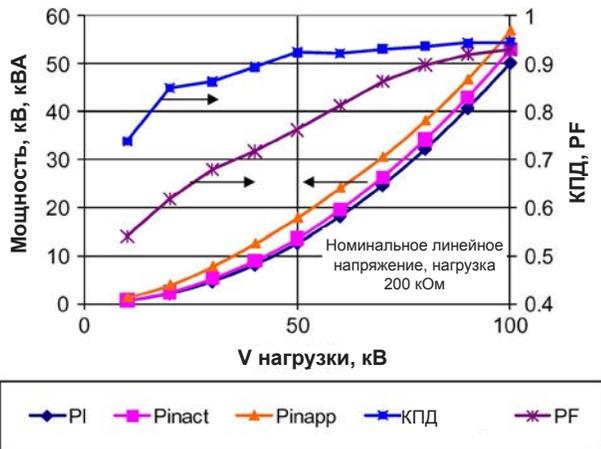


Рис 12. То же, что на рис. 11, для нагрузки 200 кОм

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

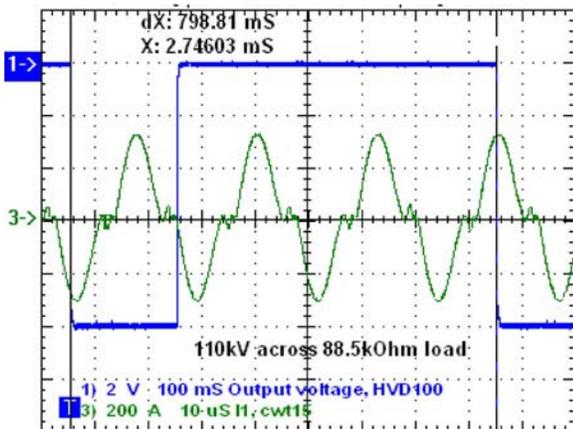


Рис 13. Работа с импульсами большой длительности: 110 кВ, пиковая мощность 137 кВт и средняя мощность 34 кВт. (Развертка 1) напряжение нагрузки и (развертка 3) ток в первичной обмотке (после установления напряжения) показаны в различных масштабах времени. Номинальное линейное напряжение

написания этой статьи всего выработано $1.1 \cdot 10^6$ импульсов.

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 всесторонние 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 вентиляционной 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. Kazimierzczuk and D. Czarkowski, *Resonant Power Converters*. New York: Wiley, 1995.
- [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, "High-frequency 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 4375 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
- [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, Науррауге, 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.