

Основные технические характеристики современных высоковольтных источников питания

Дерек Чеймберс, старший вице-президент, и Клифф Скапеллати, вице-президент сектора разработок компании Spellman High Voltage Electronics Corporation

Введение

Последние достижения в технологии изготовления источников питания обеспечили уменьшение их габаритных размеров, массы и рост КПД энергопреобразования по сравнению с их аналогами, которые выпускались всего несколько лет назад. Приборы этого нового класса обычно работают на высоких частотах в диапазоне от 20 до 100 кГц и практически вытеснили все прежние модели источников питания в промышленности, которые работали от сети переменного тока, в том числе даже модели с высоким уровнем выходной мощности.

Следует отметить, что для работы с высоковольтными источниками питания допускается только квалифицированный специально подготовленный персонал, знакомый со всеми возможными опасностями высокого напряжения. Основным документом по соблюдению правил техники безопасности является стандарт IEEE 510-1983 "Recommended Practices for Safety in high voltage and high voltage testing" (Рекомендуемые правила по технике безопасности при проведении испытаний, связанных с большими уровнями напряжения и мощности).

Рассматриваемые ниже разработки явились следствием двух основных факторов.

- 1) Появление на рынке принципиально новых силовых компонентов, имеющих низкие уровни потерь и работающих на высоких частотах.
- 2) Разработка новейших методов резонансного преобразования мощности.

Достоинства новых силовых компонентов:

- быстродействующие коммутирующие устройства (такие как транзисторы, мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), полевые МОП-транзисторы, однооперационные триодные тиристоры);
- ферритовые и порошковые материалы с низкими потерями для сердечников дросселей и трансформаторов;
- конденсаторы с низкими потерями;
- сверхбыстродействующие выпрямители, обладающие низким падением прямого напряжения.

Современные методы преобразования:

- коммутирующие при нулевом токе и параллельные резонансные преобразователи (разомкнутый режим);
- коммутирующие при нулевом напряжении резонансные преобразователи (замкнутый режим);
- программируемое переключение и фазоуправляемые резонансные преобразователи;
- квазирезонансные обратнoходовые и двухтактные преобразователи.

По сравнению с источниками питания, работающими на частоте сети переменного тока, высокочастотные источники обладают следующими достоинствами:

- 1) меньшие габариты и масса;
- 2) более быстрое время реакции на управляющие воздействия;
- 3) пониженное накопление энергии;
- 4) повышенный КПД энергопреобразования.



Высоковольтные источники питания с повышенной выходной мощностью, такие как серия SL компании Spellman, имеют номинальную выходную мощность до 1200 Вт и работают от сети переменного тока.

Технология

Сердцем любого высокочастотного источника питания является генератор (или преобразователь), используемый для управления выходным трансформатором. Специфические особенности проектирования, используемые в отрасли высоковольтных источников питания, слишком многочисленны, чтобы охватить их в данной статье. Причина такого разнообразия заключается в том, что каждый производитель разработал свои фирменные схемы коммутации мощности. Однако существует одна особенность, общая для всех высоковольтных источников питания, которая должна учитываться при выборе схемотехнического решения с использованием генератора или преобразователя. Эта особенность заключается в том, что емкость на вторичной обмотке повышающего трансформатора должна быть изолирована так, чтобы отражения от нее не попадали непосредственно на коммутирующие мощность полупроводниковые элементы. Такую изоляцию можно реализовать несколькими способами, в том числе:

1. использование обратноходовой схемы;
2. использование катушки индуктивности или последовательной резонансной схемы между коммутирующими устройствами и трансформатором;
3. использование трансформатора с малой индуктивностью рассеяния;
4. работа с генератором в режиме авторезонанса.

Кроме того, на выбор схемотехнического решения с генератором влияет получение нужного уровня мощности на выходе источника. Например, маломощный блок питания, применяемый в фотоумножителях, может использовать обратноходовой генератор или генератор, работающий в режиме авторезонанса, тогда как в источниках с повышенным уровнем мощности (например, свыше одного киловатта) наиболее вероятным будет использование управляемого преобразователя, питающего выходной трансформатор через катушку индуктивности, или последовательного резонансного контура.

Трансформатор также может быть выполнен в виде узла силовой цепи с резонансным преобразователем. Спроектированные надлежащим образом схемы резонансных преобразователей обеспечивают достижение следующих необходимых характеристик:

- 1) коммутацию при нулевых токах, что повышает КПД энергопреобразования и снижает потери при коммутации в коммутирующих устройствах высоких уровней мощности;
- 2) работу с синусоидальными токовыми сигналами в схеме мощного преобразователя, что снижает уровень радиопомех, обычно связанных с использованием методов широтно-импульсной модуляции;
- 3) возможность несложного параллельного включения источников питания для получения высоких уровней выходной мощности;
- 4) присущие свойства ограничения по току и защиты от короткого замыкания последовательных резонансных преобразователей.

Нормирование технических характеристик

Вероятно, общей ошибкой, которую допускают специалисты при строгом нормировании технических требований к разрабатываемому источнику питания, является их стремление избыточно нормировать требования по уровню выходной

мощности, пульсациям, температурной нестабильности и габаритным размерам. Такое чрезмерное нормирование может привести к неоправданному повышению расходов, а также снизить надежность из-за повышенной сложности прибора и большей плотности мощности. Если какой-то конкретный параметр в каталоге технических характеристик не соответствует применению, следует обратиться за консультацией на завод-изготовитель.

Правильное понимание технических характеристик

Технические характеристики, предлагаемые изготовителем источников питания, обычно содержат информацию о входных и выходных напряжениях, стабилизации выхода, пульсациях и нестабильности выхода. Зачастую для пользователя была бы полезна более подробная информация. В нижеследующих разделах характеристики источников питания рассмотрены более подробно по сравнению с информацией, содержащейся в обычных справочных листках технических характеристик. Далее приведены определения и описания требований к техническим характеристикам, с которыми сталкиваются потребители высоковольтных источников питания.

Технические характеристики изложены в перечисленном ниже порядке:

- 1) входное напряжение
- 2) выходное напряжение
- 3) выходной ток
- 4) пульсации
- 5) нестабильность
- 6) накопленная энергия
- 7) импульсный режим
- 8) стабилизация по сети
- 9) стабилизация по нагрузке
- 10) динамическая стабилизация
- 11) КПД энергопреобразования



1. Входное напряжение

Источник входной мощности, задаваемый для конкретной модели, обуславливается рядом факторов, в том числе уровнем выходной мощности источника питания и видом мощности, которая доступна в конкретных условиях применения. В общем случае маломощные высоковольтные источники питания с уровнем выхода в диапазоне от 1 до 60 ватт используют входное напряжение постоянного тока от 24 до 28 вольт, а более мощные источники питаются от сети переменного тока.

Входное напряжение постоянного тока

Во многих системах изготовителей комплектного оборудования высоковольтные источники питания являются всего лишь узлами этих систем, то есть в составе

систем уже имеются источники питания постоянного тока (например, на 24 В, 390 В постоянного тока).

Эти существующие источники постоянного тока вполне могут использоваться в качестве входных источников мощности для высоковольтного источника питания. Такой вариант удобен и экономичен для модульных высоковольтных источников питания с низким уровнем выходной мощности.

Входное напряжение переменного тока

Большая часть модулей с высоким уровнем выходной мощности (свыше 100 Вт) и модулей, монтируемых в стандартную стойку, предназначены для работы от сети переменного тока (см. рисунок 1). Эти источники питания приспособлены работать от любых сетей электропитания переменного тока, имеющихся на месте их применения в условиях пользователей. Кстати, по своим характеристикам такие сети в разных странах достаточно существенно отличаются друг от друга. Например, в США и Канаде стандартное однофазное напряжение сети составляет 115/230 вольт переменного тока с частотой 60 Гц, а в континентальной Европе и во многих других странах стандартное напряжение составляет 200 вольт переменного тока с частотой 50 Гц. В Великобритании стандартное напряжение составляет 240 вольт переменного тока с частотой 50 Гц, тогда как в Японии напряжение обычно равно 100 вольтам с частотой 50 или 60 Гц.

Большая часть источников питания имеет в своем составе трансформаторы с ответвлениями от обмоток для перекрытия упомянутых диапазонов напряжения, тогда как ряд новых источников перекрывает диапазоны от 90 до 130 вольт и от 180 до 260 вольт переменного тока без использования ответвлений. В будущем страны ЕЭС намерены стандартизовать свои электросети на 230 вольт переменного тока и частоту 50 Гц.

Вполне возможно, что для большинства предлагаемых на рынке высоковольтных источников питания будут нормированы корректоры коэффициента мощности и единые требования к параметрам входного напряжения. Однако это коснется только источников питания с уровнем выходной мощности менее 3 киловатт. При выпуске источников питания с более высоким уровнем мощности требуется руководствоваться техническими условиями заказчика.

2. Выходное напряжение

Обычно высоковольтные источники питания предназначены для режима непрерывной работы при максимальном выходном напряжении, указанном в справочных листках технических характеристик. Уровень выходного напряжения лабораторных настольных моделей и блоков питания, монтируемых в стойку, может регулироваться в широких пределах: от нуля вольт до максимального нормируемого значения. В этих моделях значения выходного напряжения могут выводиться на индикаторы измерителей либо в цифровом, либо в аналоговом виде.

Что касается модульных источников питания, они могут иметь либо предустановленное выходное напряжение, либо узкий диапазон настройки. В них для измерения напряжения предусмотрено наличие контрольных клемм, но сами измерители отсутствуют. По общепринятому правилу считается экономически невыгодным нормировать у источника питания выходное напряжение, превышающее более чем на 20% тот максимальный уровень, который реально необходим для конкретной прикладной задачи.

3. Выходной ток

Обычно источники питания предназначены для работы в непрерывном режиме при максимальном значении тока, указанном в справочном листке технических характеристик. Как правило, в источнике встраивается схема ограничения тока, чтобы ток перегрузки не превысил 110-процентный уровень от номинального максимального значения выходного тока. Для выключения источника питания при превышении нормального уровня выходного тока может быть предусмотрено средство отключения при перегрузке по току.

Для большинства стоечных и модульных источников питания предусмотрен режим стабилизации тока. Это позволяет управлять уровнем выходного тока с помощью потенциометра, установленного на передней панели, или от дистанционного

источника. Кроме того, обеспечивается автоматический переход в режим стабилизации напряжения в том случае, когда ток нагрузки ниже запрограммированного значения.

4. Пульсации

Пульсации можно определить как те части выходного напряжения, которые гармонически связаны как с частотой входного напряжения электросети, так и с частотой внутреннего генератора источника. В современных схемах с высокочастотной коммутацией пульсации являются комбинированным результатом влияния двух частот: частотных составляющих сетевого напряжения и частотных составляющих коммутации. Суммарный уровень пульсаций нормируется либо в виде среднеквадратического значения, либо в виде размаха напряжения комбинации составляющих частоты сети и частоты внутреннего генератора и обычно выражается в процентах от максимального выходного напряжения.

Величины пульсаций, которые допустимы для различных прикладных задач, весьма отличаются друг от друга. Например, они должны иметь очень низкий уровень (размах менее 0,001%) в фотоумножителях, контрольно-измерительной аппаратуре для ядерных исследований и лампах бегущей волны и до нескольких процентов, если выход можно проинтегрировать в достаточно длительном интервале времени, например, при подаче питания в электрофильтры и в аппаратуре электронно-лучевой сварки.

Уровень высокочастотных пульсаций обычно можно снизить установкой емкости на выходе источника. Однако при необходимости обеспечения быстрой реакции на управляющее воздействие величину этой емкости приходится снижать. Компромисс между скоростью нарастания выходного напряжения и уровнем пульсаций следует находить в переговорах между покупателем и изготовителем источника питания.

▪ Пульсации от частоты сети питания

При работе от сети ее частота может создавать существенную часть от полного размаха пульсаций. Обычно источник питания проектируют таким образом, что величины пульсаций от сети и высокочастотной коммутации равны, если источник питания работает на полную мощность. Необходимо отметить, что в большинстве источников амплитуда пульсаций от частоты сети ослабляется и контролируется цепью обратной связи в схемах стабилизации, которые обычно имеют полосы пропускания, включающие частоту пульсаций от сети.

▪ Пульсации от частоты коммутации

В стабилизированных источниках, работающих от входного напряжения постоянного тока, пульсаций от сетевой частоты не существует, и частота пульсаций связана только с коммутацией или частотой генератора в источнике. Чтобы уменьшить на выходе пульсации от частоты коммутации, можно использовать дополнительные фильтрующие компоненты, или иногда электронные схемы подавления пульсаций. При использовании фильтрующих компонентов типа шунтирующих конденсаторов, последовательных резисторов или катушек индуктивности, добавленных для уменьшения пульсаций, следует учитывать, что они вносят задержку в контур управления, которая неблагоприятно влияет на время реакции источника питания на изменение входных или выходных условий. В таком случае с целью сохранения стабильной работы источника параметры компонентов, которые управляют фазой сигнала в контуре обратной связи, изменяются в условиях изготовителя.

Если прикладная задача требует особенно малых величин пульсаций от высокой частоты, или от частоты сети, обычно возможно обеспечить более низкие пульсации на одной из этих частот за счет увеличения пульсаций на другой. В этих частных случаях, прежде чем сделать заказ, следует обсудить такие требования с изготовителем.

5. Нестабильность

На стабильность выходных параметров стабилизированного высоковольтного источника питания влияют следующие факторы:

- a) дрейф опорного напряжения;
- b) изменение напряжение смещения управляющего усилителя;
- c) дрейф отношения напряжений делителя обратной связи;

d) дрейф токочувствительного резистора.

Все эти изменения – функция температуры. Нестабильность должным образом выбранного опорного источника обычно меньше чем 5×10^{-6} , а ошибки смещения могут быть фактически устранены тщательным выбором управляющего усилителя. Таким образом, именно делитель напряжения и токочувствительный резистор являются основными источниками нестабильности выходного напряжения и тока.

Так как эти компоненты чувствительны к температурным изменениям, они выбираются так, чтобы работать на части их возможностей по мощности, и располагаются на достаточном удалении от горячих узлов. Однако по мере нагревания источника питания и роста температуры окружающего воздуха вокруг узлов появляются небольшие изменения отношения напряжений делителя и в величине токочувствительного резистора, которые могут влиять на уровень нестабильности.

Характеристика нестабильности обычно дается для времени после установления рабочего режима (типично 1/2 часа). Приемлемый уровень нестабильности достигается использованием делителя с низким значением температурного коэффициента, хотя это будет более дорогостоящим решением.

6. Накопленная энергия

Энергия, накопленная на выходе высоковольтного источника питания, может быть опасна для обслуживающего персонала, особенно при высоких напряжениях, так как энергия пропорциональна квадрату выходного напряжения и величине емкости выходного конденсатора. Некоторые типы нагрузок, например, рентгеновские трубки, также легко повреждаются чрезмерной накопленной энергией высоковольтного источника при возникновении дугового разряда. Источники питания, работающие на высокой частоте, предпочтительнее, чем работающие на частоте питающей сети, так как они могут использовать меньшие величины сглаживающей емкости и, таким образом, снижают опасность летального исхода от поражения электрическим током. Однако следует отметить, что источники питания с низкими пульсациями имеют дополнительную фильтрующую емкость параллельно выходу и, соответственно, более высокие величины накопленной энергии. По сравнению с источником питания, работающим на частоте питающей сети, импульсный источник, работающий на частоте 60 кГц, может иметь только часть накопленной энергии при ее сопоставлении с энергией эквивалентного источника, работающего на частоте питающей сети, так как выходная емкость первого источника может быть уменьшена в 1000 раз.

7. Импульсный режим

В то время как некоторые источники питания разработаны как источники напряжения постоянного тока, другие могут использоваться в мощных импульсных приложениях. Энергозапасаящий конденсатор располагается внутри или снаружи источника, обеспечивающего подачу пиковых импульсных токов и заряжающего этот конденсатор между импульсами. Во время импульса и цикла перезаряда источник работает в токовом режиме, возвращаясь в режим напряжения перед следующим импульсом тока нагрузки. Импульсные нагрузки в большинстве случаев относятся к одной из трех категорий:

- 1) очень узкие импульсы (от 1 мкс до 10 мкс) с коэффициентом заполнения от 0,01 до 1 %;
- 2) более длинные импульсы (от 100 мкс до 1 мс) с коэффициентом заполнения от 0,05 до 0,2%;
- 3) очень длинные импульсы (от 50 мс до 5 с) с коэффициентом заполнения от 0,1 до 0,5 %.

Первая категория включает прикладные задачи для импульсных радаров, в которых узкие импульсы длительностью в пределах микросекунды генерируются при типичных частотах повторения от 500 Гц до 5 кГц.



Компактный мощный модуль выдает 350 ватт в непрерывном режиме или 600 ватт в импульсе для испытания проекционного телевидения и электронно-лучевых трубок. Напряжение от 1 до 70 кВ и ток программируются и контролируются.

Вторая категория охватывает более широкий диапазон прикладных задач, например, проведение испытаний импульсных электромагнитных источников или кабелей, где большую часть импульсного тока нагрузки обеспечивает конденсатор, подключенный параллельно выходу. Для правильной работы в этих приложениях обычно необходимы некоторые изменения выходных и управляющих цепей; подробности нагрузочных характеристик должны быть обсуждены с изготовителем, чтобы гарантировать правильную работу в системе потребителя.

Третья категория требует источник питания, специально разработанный для обеспечения большего тока, чем его средняя расчетная величина в течение относительно длительных периодов. Типичные применения – медицинские рентгеновские системы, лазеры и высоковольтные дисплеи на ЭЛТ. Существенно, чтобы условия реальной нагрузки были полностью нормированы пользователем перед размещением заказа.

8. Стабилизация по сети питания

Стабилизация по питающей сети определяется как выраженное в процентах изменение выходного напряжения при заданном изменении напряжения питающей сети, обычно в пределах $\pm 10\%$. Измерение проводится при максимальном выходном напряжении и предельном токе нагрузки, если не оговорено иначе. Стабилизация по питающей сети большинства высоковольтных источников питания лучше чем $0,005\%$.

9. Стабилизация по нагрузке

Стабилизация по нагрузке нормируется при максимальном выходном напряжении и номинальном напряжении питающей сети и определяется как выраженное в процентах изменение выходного напряжения для конкретного изменения тока нагрузки, обычно от нулевого тока до максимального тока нагрузки. Типичная стабилизация по нагрузке большинства высоковольтных источников питания лучше чем $0,01\%$.

10. Динамическая стабилизация

Переходная характеристика выходного напряжения источника питания при скачкообразном изменении тока нагрузки характеризуется мгновенным отклонением выходного напряжения и его восстановлением.

Время восстановления – время, требующееся для напряжения, чтобы возвратиться к статическому диапазону стабилизации (см. рисунок 2). Этот параметр важен в некоторых импульсных приложениях, например, в дисплеях на ЭЛТ с растровой разверткой, где блоки видеoinформации могут вызывать скачкообразное изменение тока нагрузки.

11. КПД энергопреобразования

КПД энергопреобразования источника питания – критерий его выходной мощности относительно мощности, заданной на его входе. КПД обычно определяется в процентах, делением выходной мощности на входную мощность и умножением на 100.

Вспомогательные источники питания

Некоторые системы электропитания требуют ряда вспомогательных источников питания для обеспечения работы основного высоковольтного источника. Например, электронно-лучевая система может использовать основное питание луча (например, 60 кВ) для электрода катода плюс плавающее питание накала (например, 10 В) и плавающий источник смещения (например, минус 2 кВ), оба относительно катодного потенциала. Эти источники обычно стабилизированные и обеспечивают независимое управление в режиме тока или напряжения.

Когда вспомогательные источники используются относительно потенциала земли, их конструкция и управление ими стандартные, и во многих случаях дополнительные выходы могут быть легко получены от отводов обмотки высоковольтного трансформатора. Что касается плавающих источников питания, то в их составе имеется фирменный трансформатор или использованы методы волоконно-оптической развязки и управления. Эти источники предназначены для работы при решении приведенных ниже специфических прикладных задач.

1) Источники питания нити накала

Отдельный источник необходим для нагревания нити накала в рентгеновских, электронно-лучевых трубках и лампах СВЧ-диапазона. Пределы возможной мощности секции питания нити накала таких источников простираются от нескольких ватт до более одного киловатта в зависимости от требований для нити накала электронной лампы. Во многих рентгеновских системах, например, в сканирующих компьютерных томографах и дифракционных системах интенсивность излучаемых рентгеновских лучей управляется величиной тока нити накала в рентгеновской трубке.

2) Источники питания смещения

Источники питания смещения используются во многих электронно-лучевых и ионно-лучевых системах для управления и модуляции луча. Выходное напряжение обычно регулируется от 0 до минус 1–5 кВ относительно катодного напряжения.

3) Умножающие выходные источники

В некоторых электронно-лучевых трубках, копировальных и подобных им системах требуется несколько вторичных напряжений в дополнение к основному высоковольтному источнику, чтобы работать на нагрузку. Например, типичная ЭЛТ-система требует источник для нагревателя, источник для первой сетки (G1), источник для второй сетки (G2), фокусирующий источник, а также конечный анодный источник. Все эти выходные напряжения могут быть обеспечены одним модулем питания ЭЛТ с несколькими высоковольтными выходами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что разработчик требований к техническим характеристикам высоковольтных источников питания имеет множество вариантов выбора. Почти во всех случаях изготовители высоковольтных источников питания готовы предложить схемы источников, соответствующих специфическим требованиям заказчика. Главное, чтобы разработчик этих требований предоставил всю имеющуюся информацию, касающуюся его прикладной задачи.

Компания НТНК дистрибьютор Spellman Corp. в России и странах СНГ.

Россия, г. Москва, Огородный проезд д.5., оф. 506.

Тел\факс. (095)219-78-18, 219-50-90 www.ntnk.ru ; serg@ntnk.ru.