

by Cliff Scapellati, Vice President of Engineering

АННОТАЦИЯ

Требования, предъявляемые к электропитанию аналитических приборов, столь же различны, как и номенклатура самих приборов, которые только по напряжению питания занимают диапазон от 3 до 300000 В. Большинство требований по питанию может быть удовлетворено за счет серийно выпускаемой продукции, однако для питания высоковольтной аппаратуры нередко приходится прибегать к специальной разработке. Это касается таких областей техники как спектроскопия, капиллярный электрофорез, масс-спектрометрия, электрораспыление, лазеры, дифракция и флюоресценция рентгеновских лучей, а также других приложений – технологических, из сферы обработки и визуализации информации и т.п.

При создании высоковольтной аппаратуры необходима тщательная проработка важнейших параметров. Пульсации напряжения, долговременная и краткосрочная стабильность, повторяемость и погрешность – таков перечень наиболее важных факторов, определяющих степень надежности научной информации. Кроме того, поскольку аналитические приборы внедряются в сферу управления производственных технологических процессов, становятся в равной степени важными такие показатели высоковольтных источников, как их надежность и стабильность.

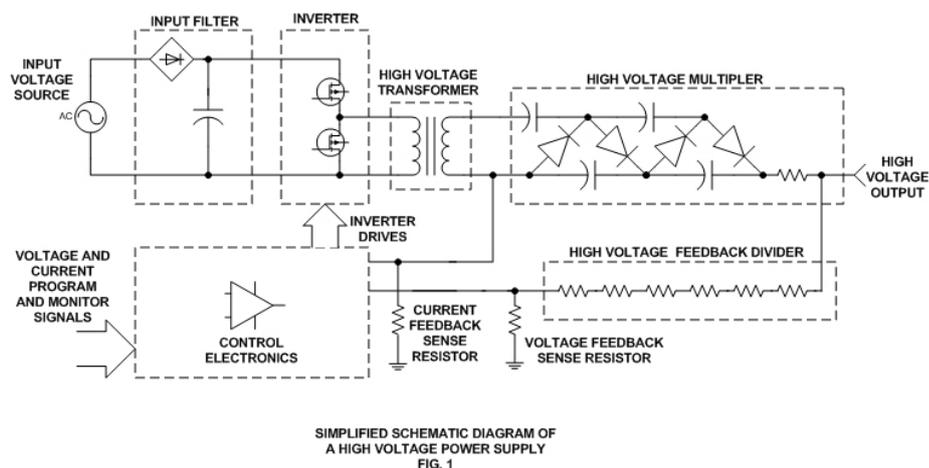
В статье рассматриваются особенности конкретного исполнения источников, технологические достижения а также данные по их применению, что может представлять интерес для разработчиков, заказчиков и пользователей аналитических приборов.

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтный источник питания – важнейший компонент многих аналитических приборов. По своей природе аналитические измерения должны быть непротиворечивыми по трем компонентам: метрологическому обеспечению, методике и полученным данным. Высоковольтный источник питания, как важнейший компонент, должен также удовлетворять условию непротиворечивости. Высоковольтный источник обладает уникальными свойствами, отличающими его от обычных источников питания. Понимание этих свойств дает существенное преимущество разработчикам и пользователям аналитической аппаратуры.

БАЗИСНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК

Базовая схема большинства высоковольтных источников показана на **Figure. 1**. Входной силовой каскад выполняет функцию согласования по входному сигналу; параметры первичного источника электроэнергии могут варьировать в широком диапазоне. Общеупотребительными являются следующие параметры сети: частота 50-400 Гц, напряжение 24-480 В; в качестве входных могут применяться также источники постоянного тока на напряжения 5-300 В. Силовой каскад может выполнять роль выпрямителя и фильтра в цепи переменного тока, а в цепи постоянного тока – функции защиты и фильтрации. Кроме того, входной силовой каскад может брать на себя функции вспомогательных источников, питающих цепи управления. Принципы работы входного каскада являются первостепенными в понимании работы всего устройства. Условия работы входного каскада влияют на построение схемных решений, пользовательские запросы и даже на правовые аспекты.



Выходным сигналом силового согласующего каскада обычно является постоянное напряжение, которое, в свою очередь, является питающим для каскада инвертера. Последний преобразует постоянное напряжение в высокочастотное переменное напряжение. Существует множество различных схем инверторов, однако, наилучшее решение определяется всего несколькими свойствами высоковольтного источника.

ИНВЕРТОР

Как правило, высокочастотный сигнал с инвертора поступает на повышающий высоковольтный трансформатор. Применение высокочастотного сигнала позволяет добиться высоких технических характеристик при одновременном снижении размеров магнитопроводов и накопительных конденсаторов. Однако при подключении трансформатора с высоким передаточным числом к высокочастотному инвертору возникает проблема: внесение паразитной емкости в первичную обмотку трансформатора с коэффициентом $(Nвт/Nперв)^2$. Эту большую паразитную емкость необходимо изолировать от ключевых устройств инвертора, в противном случае в инверторе будут присутствовать аномально высокие импульсные токи.

Другая особенность, характерная для высоковольтных источников – широкий диапазон нагрузок. Частыми спутниками высокого напряжения являются пробой изоляции (искрение). В этой связи надежность инвертора должна быть достаточно высокой с точки зрения любых возможных сочетаний открытой, короткозамкнутой цепи и состояний нагрузки.

Кроме больших вариаций нагрузки, практически всякий аналитический прибор, как правило, должен иметь высокую пороговую чувствительность и содержать каскады высокого усиления. Следует также учесть источники шума, в частности, со стороны инверторов источника питания. Сам инвертор является источником шума из-за высоких значений скорости изменения тока dI/dt и напряжения dV/dt , возникающих в моменты переключения мощности. Наилучший способ избежать этих шумов заключается в использовании резонансных ключевых схем. Не менее важно обеспечить низкие уровни пульсаций на входе и выходе, и качественное экранирование. Все эти вопросы, включая также надежность и стоимость, должны решаться в рамках топологии инвертера высоковольтного источника питания.

ТРАНСФОРМАТОР

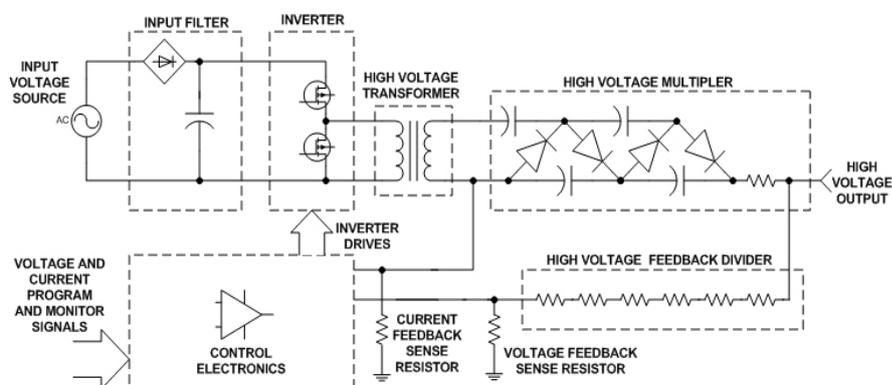
Наиболее плотным скоплением "черной магии" традиционно является высоковольтный трансформатор. В действительности никакой магии нет, просто нужно ясно понимать работу электромагнитной схемы и иметь четкое представление об используемых материалах и технологиях.

В большинстве экспертных оценок за основу принимается большое число витков и большие значения пикового напряжения во вторичной обмотке. Этими двумя факторами определяется геометрия сердечников и технология намотки, совершенно отличная от той, которая применяется в обычных трансформаторах. Могут иметь значение и другие характеристики: отношение вольт/число витков вторичной обмотки, параметр межслойного влияния и тангенс угла потерь

изоляции, геометрия намотки в контексте ее влияния на паразитную емкость и утечку, послойная пропитка намотки изоляционным лаком, уровень коронирования и другие, практически важные факторы, например, запас по перегреву или себестоимость.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ВЫХОДНОЙ КАСКАД

Высоковольтный выходной каскад выполняет функции выпрямления и фильтрации высокочастотного сигнала, снимаемого с вторичной обмотки трансформатора (рис. 2). В этих процессах традиционно используются высоковольтные диоды и конденсаторы. Однако способы их включения сильно различаются. Так, в маломощных выходных каскадах используют обычные умножители напряжения. Для силовых схем более эффективными являются модифицированные схемы умножителей и трансформаторов. Высоковольтный каскад обеспечивает также сигналы обратной связи и контроля, поступающие на обработку в управляющие цепи источника питания. Все эти элементы электрически изолированы от земли в целях предотвращения дугового разряда. В качестве изоляции используют различные материалы; наиболее распространенными являются воздух, SF₆, трансформаторное масло, твердые герметики (клеи-герметики, эпоксидная смола и др.). Выбор материала изоляции и технологический контроль могут оказаться наиболее важными с точки зрения надежности высоковольтной схемы.



SIMPLIFIED SCHEMATIC DIAGRAM OF
A HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY
FIG. 1

СХЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Схема регулирования является связующей для всех каскадов источника питания. Степень сложности схемы может быть различной – от единственной аналоговой ИС до большого числа ИС и даже микропроцессора, регулирующего и контролирующего все параметры высоковольтного выхода. Однако основные требования, которым должна удовлетворять любая цепь регулирования, сводятся к точной стабилизации выходного напряжения и тока в той степени, как это необходимо по условиям нагрузки, входной мощности и заданных установок. Наиболее эффективно это решается с помощью контура обратной связи. На рис. 3 показано, каким образом обратная связь используется для стабилизации выхода источника питания. Традиционный способ заключается в отслеживании выходного напряжения и тока и сравнении измеренных значений с опорным входным сигналом. Полученная разность (сигнал ошибки) между двумя сигналами (обратной связи и опорным) подается в управляющую цепи инвертора, что в конечном итоге приводит к изменению выходной мощности.

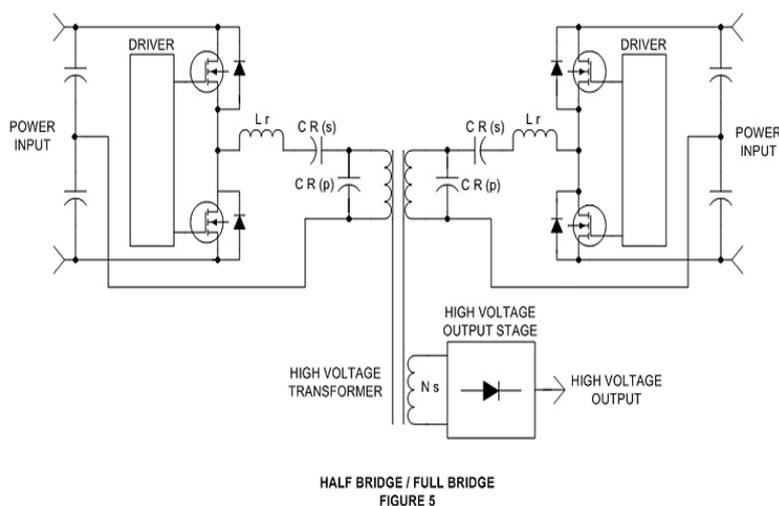
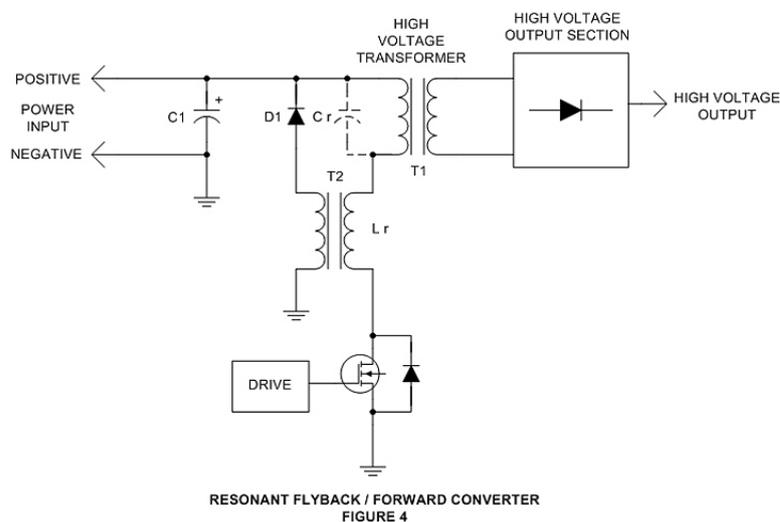
Кроме тока и напряжения могут быть стабилизированы и другие параметры. Регулирование выходной мощности легко осуществить с помощью функции $X \in Y = Z$, или $(V \in I = W)$, и последующего сравнения результата с опорным значением выходной мощности. Фактически можно стабилизировать любую переменную, удовлетворяющую закону Ома (сопротивление, напряжение, ток и мощность). Кроме того, стабилизации могут быть подвергнуты параметры, зависящие от выходной мощности (напр., интенсивность рентгеновского пучка, скорость потока и др.).

ТОПОЛОГИЯ ИНВЕРТЕРА

Как говорилось выше, на сегодняшний день существует множество топологий построения инвертера. При выборе топологии высоковольтного инвертера необходимо обеспечить следующее:

1. Развязку от паразитной емкости
2. Низкий уровень шумов.

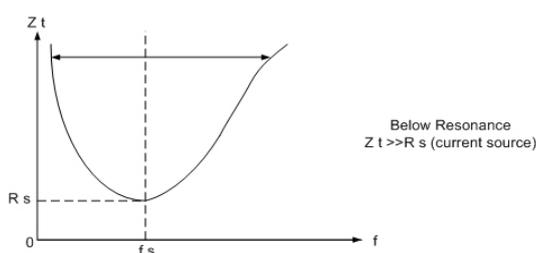
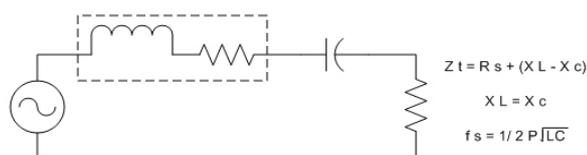
Существует общий метод, удачно сочетающий оба эти требования – резонансное преобразование энергии. Согласно данному методу для генерации высокой частоты используется параллельный резонансный контур. Возможные варианты реализации резонансного метода показаны на рис. 4 и 5. В обоих вариантах вносимая паразитная емкость изолируется последовательно включенной индуктивностью. В отдельных случаях вносимая емкость (C_R), и последовательная индуктивность (L_R) образуют резонансный контур; этот вид схем носит название т.н. последовательно-параллельной резонансной топологии. В других случаях конденсатор и индуктивность могут быть включены последовательно, образуя резонансную топологию с последовательным распределением нагрузки.



Оба этих метода имеют два существенных отличия. Параллельная топология более близка к источнику напряжения, в то время схема с последовательной топологией больше напоминает источник тока. Каждая схема имеет свои достоинства, но обычно параллельная топология

применяется в основном в маломощной аппаратуре, а последовательная – в силовой. Такая дифференциация схем по уровню мощности объясняется многими причинами; однако существует лишь несколько значимых факторов, из-за которых каждая из схем не может применяться в той области, где используется другая. Чтобы пояснить это, рассмотрим, что происходит с вносимой емкостью при коротком замыкании выхода. При этом паразитная емкость уменьшается, поскольку она шунтируется вносимой вторичной нагрузкой, сопротивление которой в данном случае равно нулю. В маломощной аппаратуре последовательная индуктивность имеет относительно высокий импеданс (в соответствии с ее вольтамперным режимом VA), что позволяет ограничить текущее значение тока в ключевых каскадах инвертора на уровне V_t/L .

В силовых схемах последовательная индуктивность имеет существенно более низкий импеданс, который не обеспечивает ограничение тока. По этой причине в силовой аппаратуре используется последовательная топология. Из рис. 6 видно, что вне области параллельного резонанса последовательная цепь функционирует как источник тока, который имеет естественный предел по выходному току и, что и обеспечивает токовую защиту ключевых цепей (рис. 6).



SERIES RESONANCE
FIGURE 6

Имеется еще одна причина, по которой последовательная схема малоприменима для маломощной аппаратуры. Легко видеть, что напряжение на последовательной емкости определяется добротностью Q резонансной цепи и напряжением, которое приложено к полной, последовательной и паразитной емкости. В маломощных цепях отношение последовательной емкости к параллельной весьма велико (опять-таки вследствие вольтамперных условий параллельного контура), из-за чего образуется делитель, в котором основное падение напряжения приходится на последовательную компоненту емкости. На трансформатор же попадает лишь небольшая часть напряжения, что существенно снижает высокое напряжение на его вторичной обмотке. Попытка исправить ситуацию добавлением витков в обмотку приводит к увеличению вносимой емкости, и в итоге напряжение вторичной обмотки остается на прежнем уровне.

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ПО ВЫХОДУ, СТАБИЛИЗАЦИЯ И ПОВТОРЯЕМОСТЬ

Выше указывалось, что непротиворечивость данных является основой аналитических технологий. Качество высоковольтного источника питания является основой стабильных и воспроизводимых характеристик аппаратуры. Изменчивость выходного напряжения и тока обычно напрямую сказывается на конечных данных и поэтому должна восприниматься как источник ошибок. В высоковольтных источниках ошибки опорного напряжения, которое используется для задания требуемого выходного напряжения, могут быть устранены за счет применения стабилизированного опорного источника на основе ИС. В типовых условиях стабильность должна быть не хуже $5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$. Соответственно, аналоговые ИС (ОУ, АЦП, ЦАП и др.) должны подвергаться тщательному отбору как <возможные> источники значительной погрешности [1].

В высоковольтных источниках имеется один принципиальный источник погрешности стабилизации – высоковольтный делитель напряжения в цепи обратной связи, который <фактически> представляет собой резистивную делительную цепочку (рис. 2), понижающую выходное напряжение до уровня, приемлемого для работы цепей управления (менее 10 В DC).

Вследствие больших значений сопротивлений (обычно не менее 10 Мом – это необходимо для рассеяния мощности и снижения эффектов температурной изменчивости из-за самонагрева) и возникает проблема стабильности резисторов обратной связи. Такое сочетание высоковольтного напряжения и высокоомных сопротивлений потребовало специальной технологии изготовления резисторов, которые выполняются спаренными с низкоомными резисторами, чтобы обеспечить сохранение коэффициента деления при изменении температуры, напряжения, влажности и времени.

В дополнение к этому, наличие в цепи ОС высокоомных резисторов делает схему восприимчивой к малым токам наводки. Например, ток величиной 10^{-9} А может дать относительную ошибку в ток порядка 10^{-4} А. По этой причине конструкция резистора и цепи ОС должна учитывать возможность возникновения коронного разряда. Кроме того, ввиду широкого применения в технологии резисторов керамических сердечников и подложек, необходимо учитывать и пьезоэлектрические эффекты. Можно показать, что вибрация в высоковольтном источнике питания может наводить на его выходе сигнал на частоте вибрации.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ВЫХОДЫ

В высоковольтной аппаратуре для питания измерительных схем часто требуются вспомогательные источники питания, которые во многих случаях работают в тесной связке с высоковольтными источниками. В качестве примеров можно привести питание накала в рентгеновских трубках, подачу напряжения смещения на управляющую сетку, питание схемы фокусировки и питание низковольтных цепей управления.

При этом разработчик может остановиться на каком-либо одном поставщике, изделия которого могут закрыть весь диапазон питающих напряжений. Такой подход весьма распространен в технике высоких напряжений, где необходима предварительная проработка схемных решений высоковольтных цепей (напр., условий изоляции накалов). В контексте высоковольтного источника питания это означает, что инженер должен проработать практически все аспекты техники преобразования энергии, не только те, которые непосредственно связаны с высоким напряжением. Например, в ходе разработки вполне может обнаружиться, что для питания накала требуется ток более 100 А при 20 В, а для изоляции такой схемы по выходу нужна изоляция прочностью не менее 100000 В. В новых высоковольтных технологиях используются даже элементы экспертизы из области управления двигателями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой высоковольтных источников питания, которые являются в некотором роде уникальными изделиями, отличающимися от стандартной продукции. Инженер, заказчик и пользователь высоковольтных источников, в целях достижения наилучших в своей сфере деятельности результатов, должны четко представлять себе эту уникальность. Продвижение технологий в сфере преобразования энергии идет так быстро, что разработчик <аналитической> аппаратуры просто не может взять на себя весь груз ответственности за источники высоковольтного питания. Эту ответственность должны разделить с ними поставщики высоковольтных источников.

Как говорилось выше, для создания надежных высоковольтных источников необходимы передовые методы преобразования мощности, компоненты, материалы и технологии. Необходимо также уделить серьезное внимание вопросам безопасного пользования. Высокое напряжение может быть смертельно опасным, и начинающий пользователь должен быть обучен правилам безопасности. Основные правила по безопасности изложены в стандарте IEEE "Руководящие

указания по безопасности при испытаниях высоковольтного и силового оборудования" (Recommended Practices for Safety in High Voltage and High Power Testing, IEEE standard 510-1983) [4].

Литература:

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