

Унификация —

это основной путь создания высоконадежных систем вторичного электропитания для комплексов военного и коммерческого назначения.

Часть 3

Рассмотрены основные методы и примеры создания аппаратуры, а также систем вторичного электропитания (СВЭП) на основе синтеза блоков питания из унифицированных узлов и модулей, разработанных и оптимизированных на основе передовых технологий с использованием компонентов отечественной электронной базы.

Проанализированы отдельные типы и приведены практические примеры создания унифицированных узлов и модулей.

Саркис Эраносян, к. т. н.
sarkis7-840@yandex.ru

В статьях [1, 2] описаны первые три методики разработки унифицированных источников вторичного электропитания (УИВЭ). Первая из них касается разработки унифицированных узлов и блоков СВЭП, которая проводится внутри крупных фирм и корпораций. Она получила название внутрифирменной узловой. Вторая демонстрирует модель разработки УИВЭ, которая определяется на основе широкого применения узлов и блоков, разработанных в рамках одного министерства или отрасли, для производства аппаратуры важного (стратегического) направления. Эта модель названа отраслевой блочной.

Третья модель разработки УИВЭ, именуемая блочно-узловой, основана на применении унифицированных узлов и блоков СВЭП внутри класса изделий и/или вида устанавливаемых в различных базовых конструкциях носителей, которые применяются в РЭА важного (стратегического) направления. К этим типам аппаратуры, которая устанавливается на определенном носителе, можно отнести радиоэлектронные комплексы на воздушных видах носителей, например самолетах, вертолетах; оборудовании и РЭА для носителей водного базирования, которыми оснащаются корабли или суда военноморского или торгового флота, подводные лодки, а также корабли специального назначения. Причем выходные параметры УИВЭ для аппаратуры и оборудования конкретного носителя должны иметь требуемые напряжения и токи, гальваническую развязку от первичной силовой сети, а также ряд других важных параметров, таких как, например, электромагнитную совместимость (в рамках действующих норм) с особо чувствительными приборами вычислительных и навигационных комплексов.

Ниже будет рассмотрена четвертая модель разработки унифицированных узлов и блоков питания.

Гибридно-электронная узловая унификация

Поясним, о каких узлах и устройствах идет речь для этого вида унификации. Основным принципом для выбора функционального узла, который необходимо выпускать в виде конструктивно оформленного модуля, является его регулярное применение во многих устройствах и блоках вторичного электропитания. Такой модуль выполнен по гибридной технологии, которая позволяет применять как микросхемы монокристалльного типа, так и отдельные компоненты на подложках, где можно использовать технологии толстой и тонкой пленки. Кроме того, в таком модуле возможно применение компонентов в мини-корпусах с планарными выводами. Процесс разработки таких модулей состоит из следующих основных пунктов.

Определение номенклатуры унифицированных узлов и модулей, которые по своей структуре подходят к использованию методики гибридно-электронной технологии в процессе их синтеза

Практически во всех устройствах преобразования энергии одного вида в другой происходят одновременно с изменением их параметров на выходе устройства. Например, получение переменного напряжения иной частоты, чем частота первичного питающего напряжения, или получение переменного напряжения заданной частоты при входном

напряжении постоянного тока, что обеспечивает на выходе устройства стабилизацию параметров переменного напряжения и его частоты.

С другой стороны, каждый отдельный вид преобразования энергии подразумевает, что в самом преобразующем устройстве всегда имеется узел управления, с помощью которого происходит включение/отключение электронных ключей (ЭК) в соответствии с принятым законом регулирования, например ШИМ, ЧИМ и т. п.

Кроме того, в этом модуле управления (МУ) должны быть реализованы и другие важные, а также сервисные функции: алгоритм включения/выключения силового блока; системы защиты ЭК от тока перегрузки и короткого замыкания; дистанционное управление и возможность изменения выходного напряжения; сигнал исправности и/или перегрузки и т. п.

Таким образом, разработка унифицированного модуля управления в виде отдельного устройства оправдана и целесообразна. Разумеется, МУ должен выпускаться в нескольких модификациях, например МУ-ШИМ, МУ-ЧИМ, МУ-КвРП. Наличие модификаций обусловлено тем, что каждый тип модуляции импульсов рабочего режима преобразования и управления ЭК имеет характерные особенности применения. Например, для МУ-ШИМ необходимо задавать минимальный и максимальный размер длительности импульсов, а в режиме защиты по току нужно обязательно соблюдать правильное чередование полярности напряжения, поступающего на первичную обмотку силового трансформатора [3]. Для МУ-КвРП необходимо, чтобы длительность полупериода импульса резонансной частоты (T_p) преобразования всегда была меньше половины периода частотно-импульсной максимальной частоты ($f_{\text{раб.м}}$) квазирезонансного преобразователя [4]. Подробно основные требования к параметрам и узлам для унифицированного модуля управления приведены в статье [5].

Современная силовая электроника невозможна без микросхем, обеспечивающих управление мощными полупроводниковыми приборами, их защиту, а также преобразование и коммутацию энергии в процессе включения/отключения ЭК. Эти устройства получили название драйверы. В общем случае их изготавливают по гибридной технологии с использованием технологии монолитных высоковольтных интегральных схем. Обычно в схему драйверов входят два (или больше) канала управления силовыми транзисторами как верхнего, так и нижнего плеча силового контура преобразователя. Функциональные схемы драйверов включают в себя входные логические элементы, схемы сдвига уровня управляющих сигналов и мощные выходные, усилительные каскады на транзисторах. Кроме того, в драйверы или непосредственно в силовые модули (IPM) встраиваются эффективные узлы защит и блокировок, предназначенных для ограничения перегрузок по току и корот-

кому замыканию. Причем эти узлы гарантируют при перегрузке ЭК работу на безопасном уровне тока, а в случае короткого замыкания формируется повторно-кратковременный режим работы ключа, благодаря которому обеспечивается допустимо-комфортный режим температуры перегрева кристалла. Для выполнения этих защитных функций в схемы драйверов встраиваются различные электронные компоненты: оптрона, триггеры, компараторы, операционные усилители, таймеры, генераторы импульсов и т. п. Драйверы для силовых электронных ключей назовем Др.ЭК.

Ниже перечислены основные функции, которые должны быть сосредоточены в Др.ЭК. На схему драйвера необходимо подать напряжение (20–25 В) питания от вспомогательного источника питания (Вс.ИП). Во многих приложениях желательно, в том числе и с точки зрения повышения надежности работы силового устройства (СУ), использовать для питания Др.ЭК один источник вторичного электропитания (ИВЭ), изолированный от входного питающего напряжения. При этом для организации двух источников Вс.ИП (положительного и отрицательного) делается искусственная средняя точка, например с помощью конденсаторного делителя напряжения. Один из вариантов реализации вспомогательного источника питания приведен в работе [5].

Другими сигналами, поступающими на Др.ЭК, являются: входной управляющий импульс, получаемый от МУ через узел гальванической развязки (оптрон); токовый сигнал, обычно встроенный в корпус ЭК в виде отдельного выхода, например типа токовое зеркало, который развязан от выводов основного кристалла силового прибора; напряжение насыщения ($k\text{-}\varepsilon$) для IGBT или падение напряжения на переходе $R_{DS(on)}$ в режиме открытого MOSFET, которое подается на соответствующий вход через развязывающий высоковольтный диод.

К основным задачам, решаемым посредством функциональной схемы Др.ЭК, относятся: преобразование параметров импульсов управления от МУ с помощью усилительных и согласующих узлов в оптимальные импульсы включения (отключения), которые подаются на затворы ЭК; контроль возникновения перегрузки по току в ЭК, причем в ряде случаев этот сигнал может подаваться на вход МУ; контроль чрезмерного роста остаточного напряжения на открытом ЭК, который может быть вызван, например, режимом КЗ в нагрузке преобразователя. В этом случае должен быть запущен специальный алгоритм повторных включений (отключений) силовых ключей или всего силового устройства (СУ), которые обеспечивают плавное (с минимальных токов) включение ЭК при постоянном контроле остаточного напряжения в случае перехода насыщенного ключа до восстановления нормального режима его работы, после устранения режима КЗ. Как уже отмечалось в работе [5], многие фирмы, производящие Др.ЭК, используют

принцип формирования выходных импульсов управления для затворов ЭК, который основан на энергии, получаемой от накопленного заряда в специальном «бутстрепном конденсаторе» (БК). Кроме того, для этого варианта схемы драйвера необходимо иметь в нем дополнительные узлы, выполняющие контроль величины напряжения БК, устройства сдвига уровня (вверх и вниз), в которых используются маломощные высоковольтные транзисторы, а также усилители и согласующие каскады, которые формируют импульсы, подаваемые на затворы ЭК. Поэтому для определения оптимальной структуры усилительного выходного каскада управления ЭК необходимо проводить дополнительные исследования с целью конкретного выбора между потенциальной схемой с накопительным конденсатором БК или с использованием развязывающего трансформатора управления ($Tr_{\text{уп}}$). Отметим, что особый интерес к этому вопросу проявился в процессе разработки структурной схемы драйвера для квазирезонансных преобразователей.

Рассмотрим этот вопрос подробнее, а именно, с точки зрения создания специального типа драйвера для регулирования от модуля МУ-КвРП, который обеспечивает эффективное управление несколькими силовыми модулями преобразователей на основе КвРП. Последнее весьма актуально для синтеза мощных и сверхмощных блоков питания [6].

Особенности разработки МУ-КвРП и драйвера (Др.ЭК-КвРП), предназначенного для управления мощным блоком питания

По мнению автора, особый интерес представляет рассмотрение варианта выполнения усилителя мощности (УМ) выходного импульса модуля управления, который основан на применении в качестве устройства гальванической развязки специальной схемы формирования выходных импульсов управления для затворов ЭК, включающей в себя трансформатор $Tr_{\text{уп}}$.

Как отмечалось ранее, структура силовой части КвРП содержит два силовых ЭК, которые включаются и отключаются одновременно. При этом целесообразно рассмотреть вариант разработки отдельного усилителя мощности (УМ), предназначенного для усиления выходного импульса МУ, с учетом того, что от одного модуля управляется группа мощных унифицированных силовых модулей (СМ), каждый из них представляет собой отдельное функциональное СУ [7]. Структурная схема УМ приведена в статье [5].

Схема УМ состоит из двух функционально разных частей. Первая обеспечивает формирование импульса включения ЭК, а также импульса сдвига (Δ) и импульса выключения ЭК. В структуру УМ дополнительно включены промежуточные типовые узлы (триггеры или одновибраторы), например в виде микросхемы, которая состоит из двух моностабильных мультивибраторов с управляемым запуском.

Вторая часть схемы УМ выполняет функцию транзисторного импульсного усилителя с трансформаторной нагрузкой на его выходе. В результате этого на выходе узла МУ формируются как сигналы сдвига по фазе ($УЗ_{\phi}$) для включения каждого последующего блока СМ, так и импульсы включения (отключения) для затворов ЭК.

Это обеспечивает в системе КвРП включение каждого последующего мощного СМ через небольшую задержку Δ по времени сразу после завершения полуволны силового тока через ЭК, которые входят в схему предыдущего силового модуля. В результате происходит выравнивание тока потребления от силового мощного выпрямителя промежуточного звена постоянного тока, поскольку все силовые модули питаются от одного выпрямителя.

Таким образом, на выходах УМ образуются два отдельных гальванически развязанных сигнала ($Уу.з$) в виде импульсного переменного напряжения, предназначенного для затворов двух силовых ЭК схемы КвРП.

Поскольку выходные сигналы унифицированного узла УМ могут поступать на разные типы силовых электронных приборов, например на ЭК на основе MOSFET либо на IGBT, каждый из которых имеет свои параметры тока включения и напряжение запирания, то необходимо еще одно промежуточное (согласующее) звено, включенное между выходом УМ и входом ЭК.

Узел, выполняющий роль устройства согласования с входными параметрами затворов силовых ключей, назовем Усог. При этом элементы Усог. должны быть оптимально рассчитаны для формирования параметров как положительного тока затвора ЭК в процессе его включения, так и отрицательного импульса для его запирания. Кроме того, необходимость существования Усог. обусловлена следующим обстоятельством. Дело в том, что при аварийном пробое мощного ЭК

на затворах может возникнуть высоковольтный импульс напряжения, который в общем случае приводит к каскадной аварии узлов, гальванически связанных с выводами затворов. Чтобы избежать эффекта каскадной аварии, можно последовательно с резисторами, установленными в Усог., установить быстродействующий предохранитель или, например, специальный элемент в виде перемычки на печатной плате, которая, испаряясь, разрывает цепь от обмотки выходного импульсного трансформатора ($Тр_{уп}$) в драйвере МУ-КвРП. Иногда вместо такой перемычки устанавливают микроомный резистор и т. п.

Таким образом, при выходе из строя электронного прибора (ЭК) не повреждаются серьезно ни узел МУ, ни устройство Усог. При этом после ремонта блока питания путем замены электронного прибора на новый (исправный) необходимо либо восстановить, например, перемычку, либо, в крайнем случае, заменить весь узел Усог. Схема Усог. приведена на рис. 1.

На вход Усог. поступают импульсы $Уу.з$ от усилителя мощности. Причем один импульс на Усог.1 поступает от УМ для первого ключа ЭК1, обозначенного на рис.1 как V1. Аналогично второй импульс от УМ поступает на Усог.2, который предназначен для второго ключа ЭК2, который обозначен V2. Причем, как было сказано выше, силовые ключи ЭК1 и ЭК2 в системе однотактного КвРП работают синхронно. Поясним функцию резисторов R1, R2 и R3, представленных на рис. 1. Эти резисторы играют согласующую роль, так как речь идет об унифицированном узле, предназначенном для параметров управления разного типа ЭК. Резистор R1, включенный последовательно с выводом затвора ЭК1 с учетом резистора в УМ, задает максимальный пиковый (положительный) ток затвора (I_{EM}) при его включении. Последовательная цепь из диода D1 и резистора R2 также совместно с резистором в УМ формирует пиковый (отрицательный) ток затвора в момент запирания ЭК1. Резистор R3, включенный параллельно переходу (З-И), позволяет уменьшить отрицательное напряжение на затворе после выключения ЭК1, а также ускорить разряд остаточной энергии во вторичных обмотках трансформатора $Тр_{уп}$ в УМ.

Теперь можно составить структурную схему драйвера для управления силовыми ключами в блоках питания на основе КвРП. Таким образом, устройство драйвера силового ключа (Др.ЭК) должно включать в себя УМ и Усог. Наряду с этими узлами в Др.ЭК необходимо включить узлы, выполняющие следующие функции: контроль напряжения на открытом ЭК, например для силового ключа типа IGBT; обнаружение КЗ; плавный вывод СУ из режима короткого замыкания и формирование сигнала на запрет включения СУ в том случае, когда произошла необратимая авария. Предполагаемая структура блока питания с преобразователем на основе токового КвРП представлена на рис. 2.

Как видно из рис. 2, мощный блок питания питается от трехфазной сети переменного тока напряжением, например, $380 В \pm 20\%$ с частотой 50 Гц. Сетевое напряжение поступает на трехфазный входной выпрямитель (Вх.В), мост Ларионова, на выходе которого установлен сглаживающий металлопленочный конденсатор С1, например типа К-73-50 (15 мкФ, 1000 В). Между конденсатором С1 и сглаживающим фильтром, состоящим из силового дросселя ($L_{Др.С}$) и конденсатора С2, установлен нелинейный токоограничивающий элемент. Он представляет собой параллельное соединение тиристора Т1 и ограничивающего резистора $R_{огр}$. Необходимость введения этого элемента защиты от чрезмерных токов через силовой выпрямитель Вх.В и силовые сглаживающие конденсаторы подробно рассмотрена в работе [3]. Постоянное напряжение на конденсаторе С1 (под нагрузкой мощностью 3,50–4 кВт) находится в пределах 380–600 В. При этом напряжение в режиме холостого хода может достигать значения приблизительно 640 В. Отметим, что величина резистора $R_{огр}$ должна предотвращать возникновение резонансного процесса зарядки С2 через индуктивность $L_{Др.С}$. Для принятых в рассматриваемом случае параметров LC-фильтра, когда индуктивность $L_{Др.С}$ равна 4 мГн, а емкость конденсатора С2 ≈ 250 –300 мкФ, резистор должен быть больше 20–30 Ом. На выходе сглаживающего силового фильтра формируется постоянное напряжение U_0 . Таким образом, образуется звено постоянного тока, от которого могут запитываться силовые модули СМ, представляющие собой автономные унифицированные устройства (заданной мощности), например выполненные в виде квазирезонансных, высокочастотных (150–300 кГц) преобразователей постоянного напряжения.

Для того чтобы значительно уменьшить высокочастотные помехи (пульсации) на конденсаторе С2, которые могут попадать в питающую сеть, необходимо, чтобы перед каждым модулем СМ был установлен дополнительный, блокирующий LC-фильтр (Бл.Ф₁). На рис. 2 перед преобразователем СМ1 показан сглаживающий фильтр Бл.Ф₁, который состоит из дросселя $L_{Бл.Ф}$ и конденсатора $C_{Бл.Ф}$. Напряжение на его выходе обозначено как U_{01} , которое поступает, например, на вход СМ1. Можно получить значение переменной составляющей на конденсаторе С2 в 50–70 раз меньше, чем на выходах U_{01} , при параметрах этого фильтра: $L_{Бл.Ф} = 50$ мкГн, с номинальным током 8 А, например у дросселя типа Д13-20; конденсатора с $C_{Бл.Ф} = 40$ –50 мкФ, например типа К50-27, с напряжением 450 В, которые соединяются последовательно. Указанные параметры пульсаций приведены для мощности нагрузки единичного модуля СМ1 около 1,8–2 кВт. Разумеется, для каждого дополнительного унифицированного силового модуля СМ₁ необходим свой Бл.Ф₁. Силовая часть преобразователя на основе КвРП представлена в стандартном виде. На рис. 2 представлены следующие силовые узлы и компоненты,

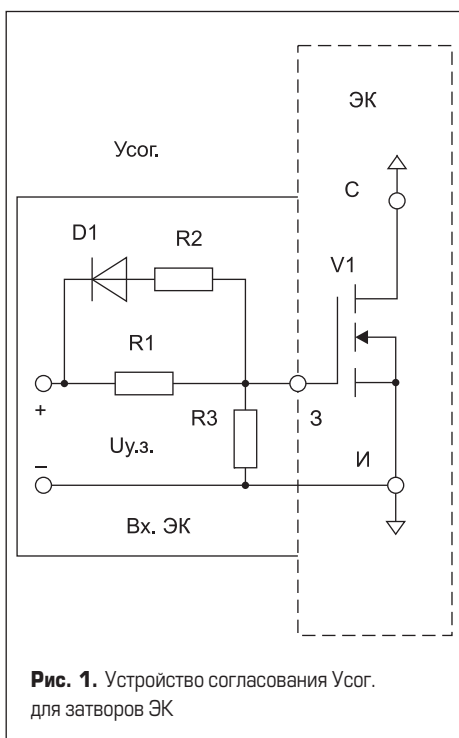


Рис. 1. Устройство согласования Усог. для затворов ЭК

а также управляющие устройства: два силовых ЭК типа MOSFET, VT1 и VT2, два диода, фиксирующих напряжение на силовых ключах на уровне U_{01} , а кроме того, силовой трансформатор Тр.С., который имеет основные (мощные) обмотки W_1 и W_2 , причем вторичная обмотка нагружена на последовательную цепь, состоящую из выпрямительного диода VD3 и коммутирующего (нулевого) диода VD4, параллельно которому включен резонансный конденсатор C_p .

Чтобы упростить рисунок, в этой последовательной цепи не показано включение дополнительного (компенсирующего) дросселя и небольшой индуктивности с отводами. Благодаря этим отводам можно при настройке СМ точно устанавливать заданную, расчетную частоту преобразования [6].

На выходе блока включен высокочастотный сглаживающий фильтр — Вч.Ф, который содержит дроссель L_ϕ и конденсатор C_ϕ . К выходным клеммам блока питания ($\pm U_{\text{вых.}}$) подключен делитель цепи обратной связи на резисторах R1 и R2, сигнал с которого ($\pm OC$) поступает на модуль управления. Сигнал ($I_{\text{защ.}}$) с датчика тока нагрузки (ДТ) тоже подается на вход МУ. Выходной импульс U_y системы регулирования ЧИМ на выходе МУ поступает на вход усилителя мощности (УМ1). Вспомогательный источник питания Вс.ИП, питающийся от напряжения U_0 , представляет собой стабилизированный преобразователь, например такой, как приведен в работе [5] (часть 3). Стабилизированное напряжение Вс.ИП — $\pm E_0$, которое должно быть в пределах 23–225 В, подается на вход МУ. Чтобы узлы УМ1 и УМi нормально работали, на них

необходимо подать питающее постоянное напряжение двух номиналов: первое, поступающее транзитом (через МУ) напряжение $\pm E_0$ и второе, стабилизированное напряжение $+E_{\text{ум}}$ величиной 12 В, необходимое для питания микросхем в УМ.

Отметим, что на рис. 2 не показан фильтр радиопомех ФРП, обязательный для этой структуры входных устройств при питании любого СУ от сети переменного напряжения. Так было сделано для того, чтобы упростить рис. 2.

Итак, описаны примеры схемной реализации четырех унифицированных узлов для управления СУ, построенного на основе КвРП: МУ, Вс.ИП, УМ, Усог.

Гибридно-электронная модульная унификация

В настоящее время нужен иной, нетрадиционный, с неожиданной стороны взгляд на ситуацию, сложившуюся в отечественной электронике. В работах [8, 9] предложено разрабатывать мощные импульсные ИВЭ на основе интегрированных силовых модулей (ИСМ/ИРМ). При этом речь идет о серийном выпуске типовых унифицированных ИРМ-узлов.

Почему целесообразно, в первую очередь, оснащать унифицированными модулями именно силовые блоки питания, входящие в СВЭП? Дело в том, что ряд устройств РЭА, таких как силовые преобразователи напряжения и источники вторичного электропитания, которые обычно занимают до 20% объема всего комплекса аппаратуры, состоят, в принципе, из однотипных функциональ-

ных узлов (устройств). Например, для сетевых блоков питания типовой набор включает в себя входной выпрямитель, корректор коэффициента мощности — ККМ/PFC (Power Factor Corrector), силовой регулирующий (ключевой) элемент ЭК, выходные ВЧ-выпрямители, сглаживающие фильтры, а также систему управления с цепью обратной связи. Кроме того, практически все блоки питания содержат узлы подавления радиопомех, сервисные устройства контроля выходных параметров, узлы защиты от перегрузок по току, перенапряжения, перегрева и т. д.

Синтез перспективных унифицированных блоков питания для СВЭП с использованием ИРМ-модулей и интеллектуальных систем с микропроцессорным контроллером, управляющим модуляцией силового ключа, адаптированного к различным режимам нагрузки, в некоторой степени рассмотрен в работах [10, 11]. В них на примерах применения интеллектуальных силовых модулей в системах электропривода показан один из путей синтеза функционально законченного прибора. Отметим, что гибридно-электронная интеграция, на основе которой можно формировать унифицированные модули различного назначения, включает в себя несколько уровней структур микроэлектронных приборов. Их сочетание, как в своеобразной пирамиде, формирует законченное функциональное устройство следующим образом. Берется основное ядро — силовой ключ (модуль ИРМ), к которому добавляется система управления ключом, а также интеллектуальная система для задания и поддержания выходных и контрольных режимов ИВЭ.

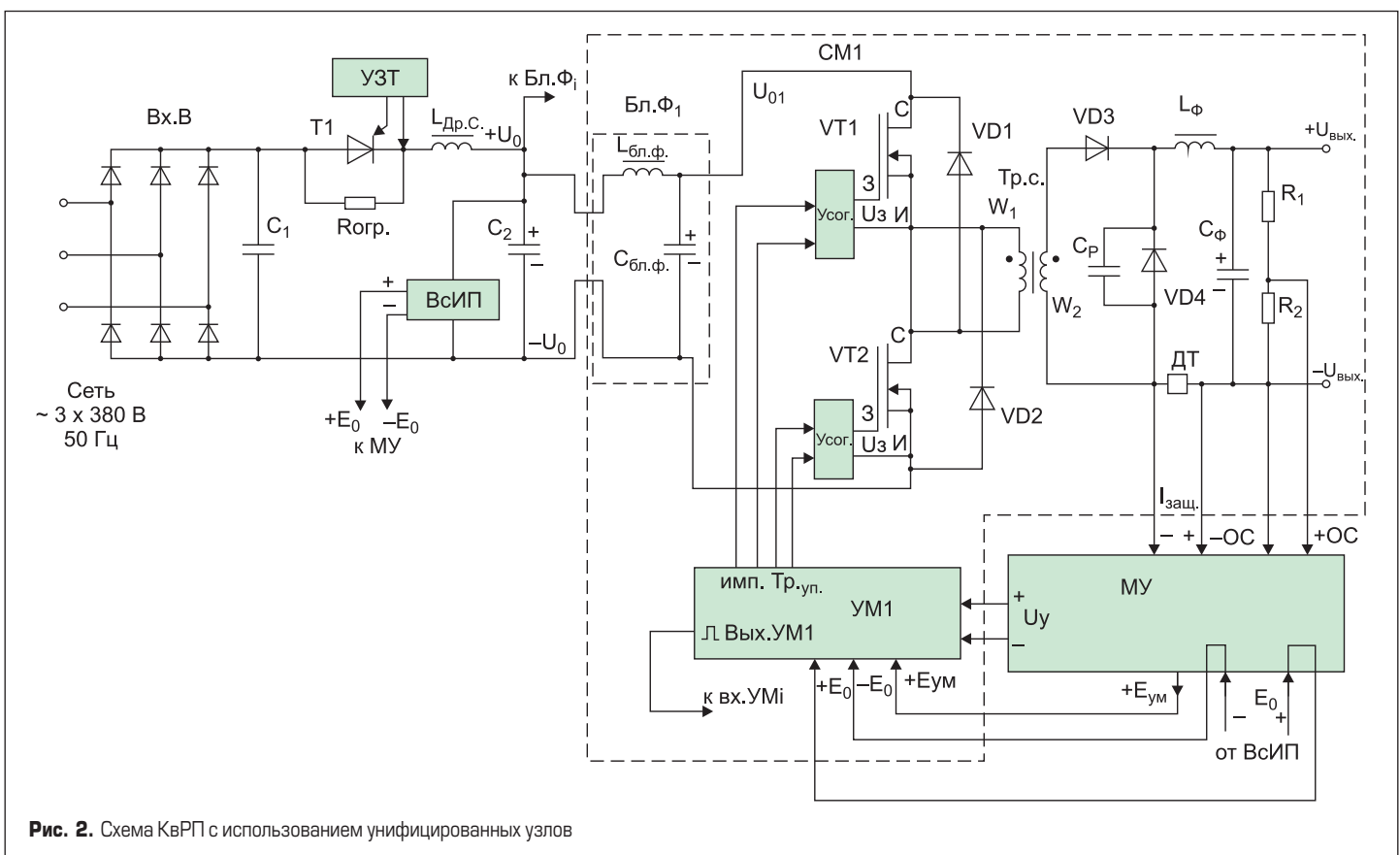


Рис. 2. Схема КвРП с использованием унифицированных узлов

Наконец, завершает эту пирамиду комплексы стиковочных элементов для формирования внешней оболочки теплопроводной печатной платы с IPM-модулем и системой его охлаждения.

При конструировании блоков питания на основе разработанных отдельных унифицированных модулей необходимо использовать различные виды технологий их «связки», в частности, технологию монтажа на поверхность (SMD), электроизолирующие покрытия, компаундирование и общую герметизацию (при необходимости). Все типы и модификации разрабатываемых модулей должны концептуально выполняться на основе однотипных технологических процессов, что дает возможность при отработке первых образцов успешно решать возникающие технологические проблемы. Полученный при этом опыт позволит потом «тиражировать» новую технологию во всех разрабатываемых модулях.

Одновременно с созданием типовых модулей для аппаратуры военного назначения следует вести разработку технических решений для производства аналогичных устройств, предназначенных для аппаратуры промышленного и коммерческого назначения. Разумеется, при этом должна значительно снизиться цена таких коммерческих модулей в результате применения менее дорогих материалов, комплектующих, корпусов, упрощения ряда технологических операций, проверок и т. д. Указанные меры позволят быстрее окупить средства, вложенные в разработку и серийное изготовление, а также значительно расширить рынок сбыта этих новых приборов. Задача создания новых приборов решается на стыке различных научно-технических проблем при взаимном дополнении отдельных направлений микроэлектроники.

Среди них стоит отметить следующие: твердотельную технологию выращивания кристаллов мощных диодов, в том числе и на основе карбида кремния, МОП-транзисторов и биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT); технологию микромощных интегральных схем управления (контроллеров) для силовых ЭК; современную технологию теплопроводных печатных плат (Thermal Clad IMS) [12]; полупроводниковую и керамическую технологию изготовления изолирующих материалов и создание на их основе пассивных компонентов [13, 14].

На основе подробного анализа силовых модулей, применяемых в современных блоках питания [15], показано, что степень интеграции существующих IPM-узлов недостаточна для нового поколения ИВЭ. Для этой цели был конкретизирован ряд мощностей сетевых ИВЭ (200, 400 и 800 Вт), предназначенных для наглядной демонстрации технологических преимуществ конструирования нового поколения приборов, названных супер-IPM (SIPM). Для примера кратко рассмотрим формирование отдельных модулей для сетевого блока мощностью до 800 Вт. Разработка и параметры этих модулей подробно приведены в статьях [9, 15].

Первый модуль — входной супермодуль (SIPM-in) включает в себя узлы сетевого блока после входного предохранителя, терморезистора и варистора до выходного напряжения повышающего стабилизатора, выполняющего функцию устройства коррекции коэффициента мощности (KKM/PFC).

Второй модуль (SIPM-DC/AC) содержит однотактный преобразователь (DC/AC), подключенный к выходу повышающего стабилизатора первого модуля.

Третий модуль — выходной супермодуль (SIPM-out) включает в себя узлы выходного высокочастотного силового выпрямителя

ИВЭ. Причем нужно отметить, что выходной модуль целесообразно разрабатывать в двух модификациях. Первая предназначена для низковольтных (low voltage — LV) ВЧ-выпрямителей при выходном напряжении ИВЭ до 10 В. Для этой модификации в качестве выпрямительного узла применяется система с силовыми полевыми транзисторами, работающими по схеме «синхронного выпрямителя». Обозначим этот вариант модуля как SIPM-out/LV. Вторая модификация предназначена для более «высоковольтных» (high voltage — Hv) выпрямителей при выходном напряжении ИВЭ более 10 В. В этом варианте выпрямительного узла применяются дискретные диоды или диодные сборки, выполненные на высоковольтных диодах, например с быстрым восстановлением (fast recovery diodes или диодах Шоттки). Этот вариант модуля будем именовать SIPM-ouT/Hv. На основе трех разработанных гибридно-электронных типов модулей SIPM был синтезирован сетевой ИВЭ с выходной мощностью 400 Вт (5 В, 80 А). Структурная схема этого блока питания представлена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, схема блока состоит из трех унифицированных гибридно-электронных модулей, подробное описание каждого из которых приведено в работе [9]. Первый модуль — SIPM-in (описание из работы [9]) — состоит из последовательно соединенных узлов. Первый узел А1 — это входной помехоподавляющий фильтр, выход которого поступает на следующий узел — входной низкочастотный выпрямитель VD1. Напряжение с выхода выпрямителя поступает на узел А2, который выполняет функцию активного корректора коэффициента мощности PFC, построенного по известной схеме [16] Он состоит из микросхемы PFC (UC1855), включенной по стандартной схеме, а также из силовых элементов повышающего стаби-

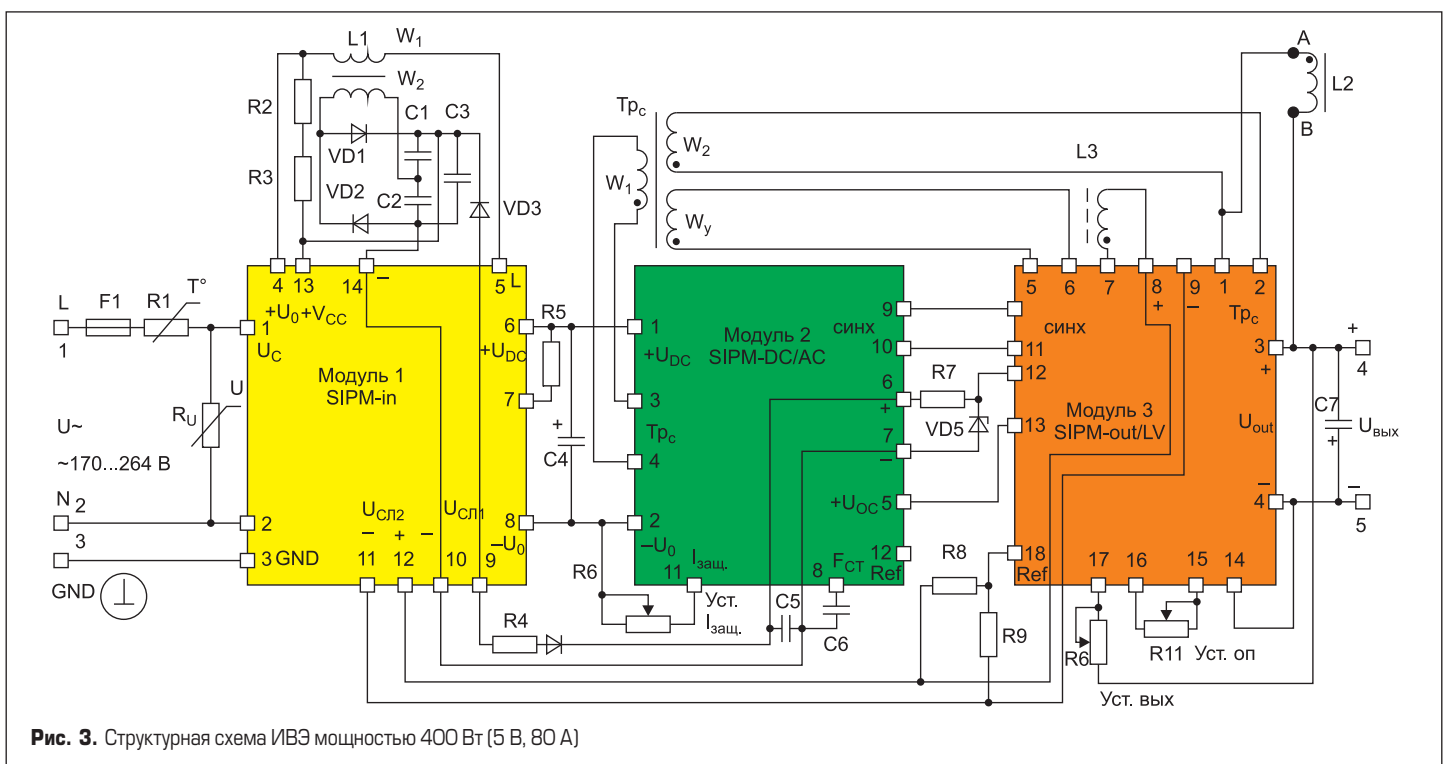


Рис. 3. Структурная схема ИВЭ мощностью 400 Вт (5 В, 80 А)

лизатора напряжения, в число которых входит накопительный дроссель L1, который с дополнительными элементами установлен вне модуля SIPM-in (рис. 3). Кроме того, в узле A2 имеются элементы, формирующие схему для уменьшения динамических потерь при выключении силового транзистора. На выходе этого узла создается стабилизированное постоянное напряжение (вывод 6 на рис. 3) +U_{DC}, обычно составляющее 350–400 В. Это напряжение поступает на вход узла A3, который представляет собой вспомогательный источник вторичного электропитания, имеющий два гальванически развязанных выходных канала: U_{сн1} и U_{сн2} (выводы 9, 10 и 11, 12 на рис. 3). В качестве его можно применить маломощный, 1–3-Вт источник питания, выполненный на микросхеме UCC3889 [17].

Второй модуль SIPM-DC/AC [9] представляет собой силовой однотактный преобразователь с двумя одновременно включаемыми силовыми транзисторами (схема «косой полумост»). Силовые ключи управляются импульсами от маломощного трансформатора Тр.у., включенного на выходе специальной микросхемы UC3707, которая получает импульсы управления от выходных выводов ШИМ-контроллера (UC3841). Рабочая частота преобразователя устанавливается конденсатором С6, соединенным с выводом 8 (F_{СТ} на рис. 3). Нагрузкой преобразователя является силовой трансформатор Тр.с, первичная обмотка W1 которого включена между выводами 3 и 4 узла (рис. 3). Микросхема контроллера питается от служебного источника U_{сн1} через резистор R4, диод VD4 и конденсатор С5 (рис. 3). Установка порога срабатывания схемы защиты по току (U_{ст} I_{защ}) силовых транзисторов преобразователя выполняется потенциометром R6, который включен между выводами 2 и 11 (рис. 3). Кроме того, на выводы этого модуля (9 и 10 «синхр.») поступает импульсное напряжение от дополнительной обмотки трансформатора Тр.у. Как будет показано ниже, этот сигнал используется в схеме ИВЭ для варианта силового выходного выпрямителя с синхронным выпрямлением на полевых транзисторах.

Переменное высокочастотное напряжение с обмотки W2 силового трансформатора Тр.с подается на выводы 1 и 2 третьего модуля SIPM-out/LV (рис. 3), так как выходное напряжение синтезируемого блока ИВЭ равно 5 В. Причем этот модуль представляет собой реализацию модификации, в качестве которой используется высокочастотный выпрямительный узел на основе системы с силовыми полевыми транзисторами, работающими по схеме «синхронного выпрямителя». Напряжение на обмотке W2 выпрямляется с помощью двух вентилялей. В качестве вентиля, детектирующего прямой импульс ШИМ-сигнала, использован полевой транзистор VT1, включенный между выводом 2 и выводом 4 (рис. 3).

В качестве «нулевого» вентиля использован полевой транзистор VT2, включенный между выводом 4 и выводом 1 модуля. Этот вывод, в свою очередь, соединяется с выводом А дросселя фильтра L2, расположенного вне модуля 3, а второй вывод дросселя В соединен с выходным выводом 3 модуля. При этом между выводами 3 и 4 образуется выходной сигнал блока питания U_{ВЫХ} (рис. 3), к которому подключен узел конденсаторов выходного фильтра С7. Транзисторы синхронного выпрямителя VT1 и VT2 управляются с выходов микросхемы DA1, которая входит в состав узлов модуля SIPM-out/LV. В качестве ее типа может быть использована микросхема из ряда UC1715...U3715 [17], на вход которой через диод поступает импульс синхронизации с обмотки Тр.у модуля SIPM-DC/AC. При этом на ее выходах формируются по два сигнала управления PWR и AUX, которые поступают на затворы транзисторов VT1 и VT2 соответственно. Импульс синхронизации повторяет по длительности импульс ШИМ-сигнала. Алгоритм управления транзисторами синхронного выпрямителя задается специальными временными задержками, которые формируются с помощью резисторов на входах T1 и T2 микросхемы UC1715. В результате на ее выходах создаются импульсы следующего вида: импульс PWR сдвинут относительно фронта импульса AUX формируется только

после окончания импульса PWR (ΔT2), а спад импульса AUX — до переднего фронта импульса PWR (ΔT1).

Таким образом, задается оптимальная форма управления транзисторами VT1 и VT2 для реализации функции синхронного выпрямителя при минимальных динамических потерях мощности в транзисторах.

Питание микросхемы DA1, например UC1715 (вывод Ucc), осуществляется от вспомогательного источника питания Uсл.2, получаемого с выходов 11 и 12 модуля SIPM-in (рис. 3). Оно подается на выводы 8 и 9 модуля SIPM-out/LV и через выпрямительный диод от вывода 5 на вывод 7. Сглаживающий дроссель фильтра L3 не входит в схему выходного модуля, а включается между выводами 7 и 8 (рис. 3). Таким образом, при работе преобразователя в штатном режиме обеспечивается «самопитание» микросхемы DA1, а при необходимости и других узлов выходного модуля ИВЭ.

Стабилизация выходного напряжения ИВЭ — U_{ВЫХ} осуществляется с помощью сигнала обратной связи Uос, который формируется на выводах 12 и 13 (рис. 3) выходного модуля. При этом выходной фототранзистор DA2 (U_{oc}) питается от вспомогательного параметрического стабилизатора R7, VD5, подключенного к выводам 6 и 7 второго модуля. А вывод 13 выходного модуля соединен с выводом 5 (+U_{oc}) второго модуля (рис. 3). Выходное, номинальное напряжение ИВЭ устанавливается с помощью потенциометра R6, включенного между выводами 3 и 17. Причем опорное напряжение усилителя обратной связи определяется потенциометром R11 между выводами 15 и 16. Делитель напряжения на резисторах R8 и R9, общая точка которых соединена с выводом 18 (R_{сг}) (рис. 3), задает безопасный с точки зрения питающего напряжения уровень работы микросхемы управления синхронным выпрямителем.

Итак, показаны возможная архитектура (ряд структур) и схемные решения унифицированных супермодулей, предназначенных для реального синтеза (разработки, конструирования) блоков питания мощностью 400 Вт.

Таблица. Параметры супермодулей и блока ИВЭ — 400 Вт (5 В, 80 А)

Сетевой ИВЭ – 400 Вт (5 В, 80 А): модули, узлы, компоненты									
Обозначение и наименование	R1, Ru	Модуль 1	L1	C4	Модуль 2	Тр.с.	Модуль 3	L2	C7
	R1 — терморезистор, Ru — варистор	Входной (сетевой) модуль	Дроссель накопительный	Конденсатор буферный	Преобразователь DC/AC	Трансформатор силовой	Выходной модуль	Дроссель выходного фильтра	Выходной конденсатор ВЧ-фильтра
Тип узла, элемента	TP-15- (4-й тип); BP-9	SIPM-in	Изготавливается	ЕНР (Хитано, Тайвань)	SIPM-DC/AC	Изготавливается	SIPM-out/Lv	Изготавливается	K50-37; K53-25-
Основные электрические параметры	10 Ом; 2,5 Вт; ~275 Вэф	Вход: 170–220 Вэф, 3 А; Выход: = 375–400 В	L1-1, L1-2 — последовательно соединены. I-1 = L1-2 = 250 мкГн; U = 194 В (магнитная индукция ΔB = 0,12 Тл)	220 мкФ, 450 В (4 шт. параллельно)	Вход = 400 В. Выход ≈ 450 В	Магнитная индукция ΔB = 0,06 Тл		L2 = 9,5 мкГн; L2-1, L2-2 → параллельно (L2-1 = L2-2 = 19 мкГн)	47 мкФ, 10 В 100 мкФ, 10 В
Габариты, мм	20×20×8; Ø18×5	175×50×20	Ø30×12 (2 шт.) L1-1, L1-2 → [МП-250, K24×13×7]	Ø30×40 (4 шт.)	50×60×20	48×26×56 ПК26×13 2500НМС1	60×50×20	Ø30×14 (2 шт.) L2-1, L2-2 [МП-250 K24×15×7]	Ø4,5×9; 16×17×1,6
Мощность потерь ΔP, Вт	1,7	12,3	2,8 _Σ	—	13,7 _Σ	6,6 _Σ	31,3 _Σ	4,16 _Σ	—
Потери мощности в целом Σ	Суммарный объем ИВЭ, исходя из габаритов 185×70×60 мм, равен Vивэ ≈ 0,8 дм ³ ; суммарные потери мощности в ИВЭ — Pп ≈ 73 Вт. КПД, η = 0,84								

В принципе, достаточно будет супермодулей всего четырех типов. Два из них должны иметь типовую структуру для всех значений мощностей унифицированных блоков питания УИВЭ: 200, 400, 800 Вт, а третий, выходной модуль должен иметь две модификации: одну — для блоков с выходным напряжением до 10 В, другую — для блоков с напряжением больше 10 В.

Рассмотрим некоторые важные характеристики разработанных супермодулей и синтезированного блока питания в целом с точки зрения их соответствия современным требованиям по электрическим, конструктивным и технологическим параметрам. Технические характеристики трех супермодулей и параметров ИВЭ — 400 Вт (5 В, 80 А), полученные расчетным путем, приведены в таблице.

Расчетные параметры узлов и элементов получены при использовании источников информации, приведенных в работе [9].

Конструктивные и технологические особенности типовых модулей SIPM и синтезированного ИВЭ следующие.

Модуль SIPM-in имеет общую печатную кросс-плату размерами 175×50 мм. В центральной части платы имеется окно, в котором находится металлическое основание с установленными на нем транзисторами VT1 и VT2. «Обрамление» микросхемы DA1 (резисторы, конденсаторы и полупроводниковые элементы) смонтировано на керамической плате по толстопленочной технологии с применением элементов для монтажа на поверхность. Размер платы — 35×50 мм. Резисторы мощностью выше 0,5 Вт, а также крупногабаритные конденсаторы и другие элементы модуля устанавливаются на кросс-плату.

Модуль SIPM-DC/AC целесообразно конструировать в виде единого узла с металлическим основанием. На это основание монтируются, через электроизолирующие теплопроводящие элементы, кристаллы силовых транзисторов VT1, VT2 и диодов VD1, VD2. Монтаж этих силовых элементов выполняется по технологии, приведенной в работе [18] или. «Обрамление» микросхем DA1, DA2 и узла A1 выполняется на керамической плате по толстопленочной технологии с применением элементов для монтажа на поверхность. Размер платы — 45×50 мм.

Конструкция модуля SIPM-out/LV выполняется аналогично конструкции модуля 2, т. е. на металлическое основание через изолирующие теплопроводящие прокладки устанавливаются параллельно соединенные кристаллы мощного полевого транзистора VT1 и такие же параллельно соединенные кристаллы мощного полевого транзистора VT2. Монтаж этих силовых элементов выполняется также в соответствии с представленным в работе [18]. «Обрамление» микросхем DA1, DA2, DA3 вместе с дискретными элементами схемы обратной связи выполняется на керамической плате по толстопленочной технологии с применением элементов для монтажа на поверхность. Размер платы — 45×50 мм.

Конструкция всего блока питания может быть выполнена в виде печатной кросс-платы размером 185×70 мм. С одной стороны этой платы устанавливается модуль 1 (SIPM-in), с другой — модули 2 и 3. На этой же кросс-плате монтируются дроссель L1 (два дросселя L1-1 и L1-2), силовой трансформатор Тр.С, дроссель фильтра L2 (два дросселя L2-1 и L2-2), четыре буферных конденсатора С4, а также все остальные дискретные элементы ИВЭ, согласно структурной схеме блока (рис. 3).

Данные основных силовых моточных элементов силового трансформатора и дросселей приведены в работе [9]. В результате прогнозируемые габаритные размеры синтезированного ИВЭ будут равны 185×70×60 мм, а его объем составит приблизительно 0,8 дм³. При этом прогнозируемая объемная удельная мощность блока питания составит $P_v \approx 500$ Вт/дм³.

Разработка первой серии (примерно 12 типов) унифицированных модулей SIPM для ИВЭ мощностью 100–800 Вт может быть выполнена за три года. При этом предполагается разработать комплекс автоматизированных программ для расчета и оптимизации частоты преобразования всего ряда модулей и полностью отработать технологию изготовления супермодулей с учетом их применения в блоках питания. В дальнейшем серийное изготовление заказных блоков питания с заданными техническими параметрами может быть освоено в течение 1–1,5 года. Предполагаемый срок окупаемости проекта 3–4 года после начала серийного изготовления модулей SIPM.

Заключение и выводы

- Рассмотрены пять основных моделей (видов) унификации, на основе которых можно разрабатывать УИВЭ, входящие в структуры типовых СВЭП: внутрифирменная узловая; отраслевая блочная; блочно-узловая; гибридно-электронная узловая; гибридно-электронная модульная.
- Для всех моделей разработаны методы и правила определения как перечня выходных параметров (напряжение, ток нагрузки), так и градаций мощности для каждого типоминимала блоков питания, которые формируют ряд УИВЭ.
- Унифицированные узлы и блоки питания адаптированы для каждой модели и принципа синтеза в соответствии с целевым назначением системы вторичного электропитания, которая определяется задачей, решаемой комплексами РЭА, которые входят в изделия различного назначения.
- Для всех моделей подробно рассмотрены практические примеры разработки унифицированных блоков и узлов, а также приведены основные технические и энергетические параметры этих устройств.

Литература

1. Эраносян С. Унификация — это основной путь создания высоконадежных систем

вторичного электропитания для комплексов военного и коммерческого назначения. Часть 1 // Силовая электроника. 2014, № 5.

2. Эраносян С. Унификация — это основной путь создания высоконадежных систем вторичного электропитания для комплексов военного и коммерческого назначения. Часть 2 // Силовая электроника. 2014, № 6.
3. Эраносян С. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. Ленинград: Энергоатомиздат, 1991.
4. Эраносян С., Ланцов В. Квазирезонансные источники вторичного электропитания: проблемы, новый взгляд // Силовая электроника. 2007, № 3.
5. Ключи к возрождению производства компонентов российской силовой электроники. Часть 2, Часть 3 // Силовая электроника. 2013, № 3, 4.
6. Эраносян С., Ланцов В. Сверхмощные импульсные блоки питания: выбор концепции // Современная электроника. 2010, № 8.
7. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Часть 1, 2 // Силовая электроника. 2007, № 4. 2008, № 1.
8. Эраносян С., Ланцов В. Интеллектуальные силовые модули для источников питания один из путей возрождения отечественной электроники XXI века // Электрическое питание. 2005, № 1, 2.
9. Эраносян С., Ланцов В. Разработка интегрированных силовых модулей и их применение в источниках вторичного электропитания // Современная электроника, 2006, № 8.
10. Колпаков А. Особенности применения интеллектуальных силовых модулей // Компоненты и технологии. 2002, № 3.
11. Флоренцев С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // Современные технологии автоматизации. 2004, № 2.
12. Печатные платы на основе теплопроводных электроизоляционных материалов компании Bergquist // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2002. № 2.
13. Звонарев Е. Высококачественные индуктивные компоненты фирмы Premier Magnetics для импульсных источников питания // Электронные компоненты. 2003, № 6.
14. Степанов В. Планарные трансформаторы компании Payton group // Электронные компоненты. 2003, № 9.
15. Васильев А., Худяков В., Хабужов В. Анализ современных методов и технических средств коррекции коэффициента мощности у импульсных устройств // Силовая электроника. 2004, № 2.
16. Integrated circuits unitrode. Product & Applications Handbook. 1995 11996.
17. Волошин С. Наперегонки с «Мерседесом» // Силовая электроника. 2004, № 2.
18. Колпаков А. Модули SEMITOP как альтернатива дискретным корпусам // Силовая электроника. 2004, № 2.