

Эволюция импульсных источников вторичного электропитания:

от прошлого к будущему. Часть 5.2

Саркис Эраносян, к. т. н.

sergera840@mail.ru

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Введение

Продолжен анализ путей совершенствования нового класса импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭ). Подведены итоги развития импульсных блоков питания в части схемотехники. Отмечен высокий уровень разработок отечественных ИВЭ. Рассмотрены особенности развития и применения отечественной и зарубежной компонентной базы, которая использовалась в сетевых блоках питания с 1990 до 2005 г. Выявлены основные тенденции совершенствования схем управления импульсных ИВЭ с учетом развития технологии их изготовления и миниатюризации элементной базы. При этом основное внимание уделено вопросам совершенствования параметров силового ключа и высокочастотных диодов, а также интеллектуальных узлов (элементов) систем управления ИВЭ. Кроме того, отмечены этапы развития и современное состояние в части разработок ферромагнитных материалов, используемых в высокочастотных силовых трансформаторах и дросселях сглаживающих фильтров блоков питания. Выявлены особенности эволюции импульсных ИВЭ как одного из направлений научно-технического прогресса. В частности, отмечено, что наличие объективных проблем, характерных для изделий, преобразующих энергию, препятствует получению оптимальных выходных параметров блоков питания.

Предложен возможный путь дальнейшего развития импульсных источников питания, который заключается в технологии синтеза блоков питания с заданными параметрами на основе использования новых силовых интеллектуальных (интегрированных) унифицированных модулей.

В предыдущей статье [1] рассмотрены итоги развития импульсных источников питания с разных позиций. В частности, проведен анализ исторического и научно-технического аспектов эволюции ИВЭ. Рассмотрены особенности развития компонентной базы с 1960 до 1990 г. При этом отмечены характерные этапы совершенствования основного ключевого силового элемента блоков питания от магнитного усилителя до полевого (MOSFET) транзистора и мощного интегрального прибора IGBT. Подчеркнут высокий научный уровень разработок отечественных импульсных ИВЭ, имеющих сопоставимые с лучшими зарубежными образцами характеристики как по энергетическим параметрам (КПД), так и по удельным массо-габаритным показателям.

Отмечена особая роль в эволюции импульсных ИВЭ системы получения и обмена информации, которая успешно действовала в СССР фактически до 1990 г.

Продолжим рассмотрение итогов развития импульсных источников питания с разных позиций.

Итоги развития импульсных ИВЭ в части схемотехники

Анализ схемных решений

Бурное развитие компонентной базы, особенно силовых электронных ключей, привело к тому, что применение тех или иных схемотехнических решений при построении ИВЭ практически перестало влиять на итоговые выходные данные разрабатываемых блоков питания. Важнейшими из них являются удельные показатели по объему и массе, а также КПД. При этом для товаров широкого потребления, которые изготавливаются массовыми тиражами, также большое значение имела удельная ценовая стоимость выходной мощности ИВЭ, например в \$/Вт.

Практика показала, что использование новейших компонентов для силового ключа и управляющего контроллера в сочетании с выбором лучших магнитных материалов и дискретных компонентов значительно снизило влияние на интегральные выходные параметры блока питания применения того или иного схемного варианта выполнения ИВЭ. Например, в первых БИВЭ для телевизоров использовались в основном полумостовые схемы преобразователя. Это, прежде всего, диктовалось желанием применять двухтактные схемы, в которых можно было использовать транзисторы на меньшее допустимое напряжение. Известно, что в полумостовой схеме напряжение на ключах уменьшается в 2 раза по сравнению с однотактными преобразователями, но при этом ток через силовые транзисторы в 2 раза возрастает. Важно также и то, что силовые транзисторы на меньшее напряжение были относительно дешевы и имели приемлемые качества в части коэффициента усиления и величины напряжения насыщения в открытом состоянии силового транзистора (для биполярных транзисторов). При этом частота преобразования в основном находилась в пределах 20–50 кГц. Теперь представим себе современный высоковольтный MOSFET-транзистор, имеющий напряжение от 600 до 1200 В. Он позволяет построить ИВЭ по схеме однотактного обратного преобразователя или по схеме однотактного прямоходового преобразователя с двумя одновременно вклю-

чаемыми транзисторами («косой мост»). При этом нам удастся поднять рабочую частоту преобразователя до 200–250 кГц. А еще можно использовать схему квазирезонансного преобразователя (КвРП). Этот тип преобразователя позволяет практически свести к нулю динамические потери мощности в транзисторах, что дает возможность еще больше поднять частоту преобразования. Однако следует признать, что за все достоинства той или иной схемы преобразования приходится чем-то расплачиваться. В частности, схема КвРП позволяет значительно уменьшить высокочастотные составляющие пульсации на выходе блока питания. Но, с другой стороны, в схеме появляется сложный элемент — резонансный конденсатор, который при большой переменной составляющей до 150–200 В на высоких частотах 150–300 кГц должен иметь большую допустимую реактивную мощность — от 200 до 500 ВАР. Кроме того, выходные выпрямительные диоды в этой схеме имеют значительно больший импульсный ток (в 2–3 раза больше, чем в обычной схеме ШИМ). Необходимо также учесть, что эти диоды должны быть относительно высоковольтными — от 100 до 200 В. Последнее означает, что даже при использовании диодов Шоттки они имеют повышенное падение напряжения в открытом состоянии (1,3–1,5 В).

Особо следует подчеркнуть, что силовой трансформатор для схемы КвРП становится достаточно сложным, а в некоторых случаях и уникальным — из-за требования стабильности паразитных параметров трансформатора (L_s и C_n).

В определенном смысле можно утверждать, что при современной элементной базе выходные потребительские параметры большинства высококачественных блоков питания как бы нивелируются. Они остаются высокими при разных типах применяемых схем. Конечно, если к блоку питания предъявляются уникальные требования, например малые пульсации, помехи («шумы»), повышенная надежность, широкий диапазон регулирования и т. п., то при этом могут проявляться достоинства тех или иных структурно-схемных решений. Но скорее это будет исключением из правил.

Научный уровень разработок импульсных ИВЭ

Отметим, что высокому уровню разработок отечественных импульсных ИВЭ способствовало также хорошее оснащение лабораторным оборудованием, которым не были «обделены» в достаточном количестве и специалисты по вопросам электропитания. К этому оборудованию можно отнести большое количество разнообразных типов аналоговых и цифровых вольтметров, осциллографов, как электронных, так и шлейфовых. Кроме того, в подразделениях электропитания имелось много других приборов и специального стендового оборудования, включая приборы для измерения высоких напряжений до 10 кВ и более.

В начале 80-х годов появились также RLC-измерители (например, Е7-8).

Особый интерес для исследования однократных переходных процессов представляли но-

вые осциллографы с запоминанием. Некоторые из них имели возможность сохранять кривую переходного процесса, например процесса нарастания аварийного тока в БИВЭ, до 3 суток.

При необходимости исследовать особые процессы, например амплитудно-частотные характеристики отдельных узлов систем автоматического регулирования, в ИВЭ использовались и уникальные приборы. Например, в системе стабилизации тока магнетрона [2] обратная связь была организована от специального преобразователя импульсного тока СВЧ-прибора в напряжение, пропорциональное среднему току этого прибора. Это обстоятельство привело к большим проблемам с устойчивостью системы стабилизации. Для получения необходимого запаса устойчивости была проведена работа по оптимизации передаточной характеристики всей системы стабилизации (регулирования) с целью найти оптимальные частотные характеристики звеньев контура обратной связи. При решении этого вопроса в цепь обратной связи усилителя постоянного тока (УПТ) регулируемого выпрямителя была включена аналоговая электронная машина (ЭВМ) типа МН-7, которая моделировала интегрирующие и дифференцирующие звенья в контуре обратной связи. Параметры этих звеньев, резисторы и конденсаторы были оптимизированы в режиме натурного моделирования. То есть при работающем передатчике (на заглушку), модулятор которого питался от штатного блока питания, в контуре обратной связи УПТ блока питания имелись корректирующие цепи, «набранные» в ЭВМ. Затем эти оптимизированные характеристики были фактически реализованы в узле УПТ регулируемого выпрямителя [3]. При этом с помощью специального прибора (фазометра), который имелся только в отделе электропитания, были сняты логарифмические амплитудные характеристики (ЛАХ) реализованных звеньев, установленных в реальной схеме УПТ. Этот уникальный прибор английской фирмы Muirhead позволял сразу определять коэффициент передачи исследуемого звена в децибеллах, а фазу — в градусах. Авторы упоминают об этом потому, что сейчас в России многие малые фирмы из-за экономии средств зачастую вынуждены пользоваться или устаревшими приборами, или минимумом новых приборов, не говоря уже о создании специальных стендов.

На наш взгляд, именно высокий профессиональный уровень разработчиков импульсных ИВЭ в СССР позволил практически одновременно с американскими специалистами освоить бестрансформаторные сетевые блоки питания. Это был сложнейший со всех точек зрения объект — импульсный источник питания нового поколения. Отметим, что от единичных применений этих блоков БИВЭ в 1971–1972 гг. буквально через 6–10 лет он стал самым массовым из источников питания. А уже к 1980–1985 г. применение БИВЭ позволило значительно повысить удельную выходную мощность блоков питания нового типа и приблизиться по этому параметру к лучшим зарубежным образцам.

Причем надо подчеркнуть, что эти успехи были достигнуты при общем значительном отставании отечественных компонентов для импульсных ИВЭ от зарубежных в качестве и количестве. Иллюстрацией этому может послужить тот факт, что первые контроллеры для импульсных БИВЭ нового типа на Западе появились в 1974 г., а отечественный серийный прибор аналогичного класса 142ЕУ3 вышел в серийном варианте практически в конце 80-х годов. Возможно, уже тогда это было косвенным признаком нарастающего общего отставания отечественных науки и технологии от западных. Это отставание приобрело обывательский характер в связи с распадом СССР.

Отметим, что наука и технологии на Западе, в части развития импульсных источников, также к концу XX века стали развиваться медленнее. Например, общеизвестно, что к середине 80-х годов лучшие ферриты для импульсных источников питания были разработаны в Японии. Американцы через какое-то время приняли решение прекратить собственные исследования в этой области для получения аналогичных качеств ферритов, работающих в сильных полях. По словам известного отечественного специалиста по ферритам к. ф. н. Куневича А. В., европейские страны пытались на «паевых» условиях организовать исследовательскую работу по получению ферритов с параметрами, аналогичными японским. Однако через 12–15 лет они также пришли по существу к отрицательному результату, то есть получили материалы, магнитопроводы из которых имели основные параметры на 30–40% хуже японских аналогов.

Перспективы развития компонентной базы импульсных ИВЭ

Улучшение параметров силового ключа и высокочастотных диодов

Как было показано ранее, одним из условий значительного улучшения показателей ИВЭ является появление принципиально нового силового ключа. Действительно, исторически прослеживается цепочка совершенствования ключевого элемента: электровакуумная лампа, кенотроны, ртутные вакуумные приборы, магнитный усилитель, тиристор, биполярный транзистор, полевой транзистор. Каждый из этих приборов по существу открывал новые возможности, благодаря которым непрерывно, а в момент появления нового прибора — скачком росли качественные показатели импульсных ИВЭ. Разумеется, надо отметить, что одновременно с новыми типами ключей появлялись также и другие новые силовые компоненты и управляющие микросхемы. Ранее уже отмечалось значительное улучшение полупроводниковых выпрямительных диодов — от селеновых «столбов» до современных диодов Шоттки на основе карбида кремния. После появления и совершенствования полевых транзисторов с изолированным затвором, например одного из первых MOSFET типа IRF840 (фирма International Rectifier — IR, 1988 г.) с такими параметрами, как напряжение $U_{DSS} = 500$ В, ток $I_D = 10$ А, сопротивление

канала сток-исток $R_{DS(on)} = 0,8$ Ом, произошло существенное улучшение их характеристик. Современные высоковольтные HiPerFET Power MOSFET имеют следующие параметры: напряжение $U_{DSS} = 1000\text{--}1200$ В при токе 21–30 А и $R_{DS(on)} = 0,5\text{--}0,4$ Ом, а при напряжении 800 В — ток 27 А при $R_{DS(on)} = 0,3$ Ом (при температуре 25 °С). В мощных приборах на большие токи и напряжения до 500 В можно отметить также и другие MOSFET, например IXFN48N50Q (фирма Ixys), которые представляют собой фактически параллельное соединение кристаллов отдельных транзисторов в одном корпусе. Транзистор IXFN48N50Q с напряжением 500 В имеет ток 48 А и сопротивление канала $R_{DS(on)} = 0,1$ Ом при температуре 25 °С, а при температуре 100 °С имеет ток 24 А и сопротивление 0,2 Ом. Отметим еще транзисторы на меньшее напряжение, например 85 В и большие токи. В частности, IXFN280N085 на ток 280 А и сопротивление $R_{DS(on)} = 0,0044$ Ом при температуре 25 °С.

В настоящее время следует обратить особое внимание на то, что появляющиеся на рынке новые полевые транзисторы с улучшенными характеристиками стоят очень дорого. Например, IXFN27N80 стоит \$26–33 за штуку (при разных партиях). Такая высокая цена объясняется уникальностью параметров, что означает попросту либо отбор (отбраковку) кристаллов по лучшим параметрам, либо малую серийность этих изделий. Возможно, оба этих обстоятельства влияют на их стоимость.

В последнее время, очевидно, достигнуты предельные возможности улучшения параметров образцов полевых транзисторов. Новые приборы — это, как правило, силовые модули, представляющие собой параллельные соединения «готовых» кристаллов. Такое же интегральное качество лежит в основе новых приборов типа биполярных транзисторов с изолированным затвором — IGBT, в которых, по существу, мощный биполярный транзистор управляется от высоковольтного маломощного MOSFET. Разумеется, есть области применения приборов IGBT на относительно низких рабочих частотах, например в системах регулируемого электропривода, в трехфазных коммутаторах и там, где необходим мощный одиночный (низкой частоты) импульс. Например, в рентгеновской аппаратуре по анализу алмазной шихты и т. п. Однако мощный IGBT по существу также содержит параллельное соединение менее мощных одиночных кристаллов в одном корпусе. Отметим, что параллельное соединение мощных кристаллов MOSFET позволяет по причине «автоматического» выравнивания тока в каждом параллельном элементе получать достаточно надежные интегральные приборы. Однако параллельное соединение кристаллов внутри одного корпуса прибора типа IGBT не столь однозначно обеспечивает выравнивание тока в каждом параллельном элементе. Это, в частности, объясняется нелинейностью изменения напряжения насыщения в каждом отдельном силовом биполярном транзисторе. Особенно эта неравномерность проявляется при больших амплитудах тока (100 А и более) и при малой длительности рабочего импуль-

са. Вероятно, здесь сказывается относительная инерционность (запаздывание) в нагревании кристаллов отдельных модулей, что может приводить к значительному повышению тока именно в лучшем элементе, то есть имеющем меньшее напряжение насыщения. Последнее обстоятельство может привести со временем к аварийному пробую (закорачиванию) при отсутствии управляющего сигнала всех параллельных ячеек (кристаллов). По свидетельству одного из авторов, опыт ремонта таких IGBT в заводских условиях имела в 1998–2005 гг. фирма ОАО «НПП «Буревестник», что практически подтверждает эту гипотезу. По существу речь идет о снижении надежности этих приборов после 1 года эксплуатации в непрерывном режиме функционирования.

Следует особо подчеркнуть, что практически все новые приборы в классе транзисторов, за исключением IGBT, были фундаментально описаны и предсказаны еще в 1970 г. [4, первое издание]. Это подтверждает мнение, что в настоящее время, по-видимому, отсутствует фундаментальная научная основа для создания силовых ключей нового класса. В то же время методы совершенствования технологии изготовления компонентов, изменения размеров кристаллов, а также решения проблем изоляции и отвода тепла в существенном плане практически себя исчерпали. Это особенно наглядно видно, если ввести условный параметр, который мы будем называть коэффициентом эволюции (прогресса) $K_{э\phi}$. Этот коэффициент будем находить как отношение значений какого-либо параметра, полученного в последние годы, к параметру аналогичного прибора в первые годы его создания. Например, в классе высоковольтных MOSFET-транзисторов можно проследить следующее. В 1985 г. транзистор IRF840 при напряжении 500 В и токе 10 А имел сопротивление канала $R_{DS(on)} = 0,8$ Ом (при температуре 25 °С). Затем в процессе эволюции MOSFET-приборов в 2005 г. появились более совершенные транзисторы, например IXFN48N50Q, которые при напряжении 500 В и токе 48 А имели сопротивление канала $R_{DS(on)} = 0,1$ Ом (при температуре 25 °С). Таким образом, коэффициент эволюции по напряжению ($K_{э\phi}^U$) равен 1; коэффициент эволюции по току ($K_{э\phi}^I$) равен 48/10, то есть 4,8; а коэффициент эволюции по сопротивлению канала $R_{DS(on)}$ — ($K_{э\phi}^R$) равен 0,8/0,1, то есть 8,0. В результате, определив суммарный коэффициент эволюции ($K_{э\phi,\Sigma}$) этого класса полевых транзисторов с 1985 по 2005 г. как $K_{э\phi,\Sigma} = K_{э\phi}^U \times K_{э\phi}^I \times K_{э\phi}^R$, получим его величину: $K_{э\phi,\Sigma} = 1 \times 4,8 \times 8,0 = 38,4$. Причем это улучшение произошло практически за 20 лет. Такой период улучшения параметров транзисторов можно считать обычным. В части биполярных транзисторов можно сравнить отечественный транзистор 2Т809А ($U_{CE0} = 400$ В, $I_c = 3$ А; 1971 г.) и 2Т847А ($U_{CE0} = 650$ В, $I_c = 15$ А; 1986 г.). Суммарный коэффициент эволюции в этом случае будет $K_{э\phi,\Sigma} = 1,62 \times 5,0 = 8,1$, и это улучшение произошло за 15 лет.

Используя эту методику и сравнивая разработки других компонентов 80-х годов с разработками 1995–2005 гг., можно увидеть следующее.

В 1980 г. имелись отечественные диоды Шоттки на напряжение 30–45 В и ток 20 А при прямом падении напряжения $U_F = 0,6\text{--}0,7$ В, а в 1995 г. отечественные модули мощных диодов Шоттки (г. Ставрополь) МПДШ-155-100х имели напряжение 30–40 В и ток 100 А при $U_F = 0,6\text{--}0,7$ В. То есть суммарный коэффициент эволюции в части диодов $K_{э\phi,\Sigma}^D = 1,0 \times 5,0 = 5,0$. Если учесть, что в 2000 г. зарубежный диод Шоттки фирмы IR типа IRF83CNQ100А имел при напряжении 100 В ток 80 А при $U_F = 0,67$ В, то можно сделать следующий вывод. Так как в этом корпусе прибора имеется два диода Шоттки с общим катодом, то, включив их параллельно, можно получить эквивалентный диод на ток 160 А. С учетом этого рассчитаем величину условного коэффициента эволюции в части диодов Шоттки. После соответствующих вычислений суммарный коэффициент эволюции составит $K_{э\phi,\Sigma}^D = 2,5 \times 8,0 = 20,0$, и это улучшение произошло за 20 лет.

Все вышеизложенное иллюстрирует определенный потолок в улучшении параметров как биполярных, так и полевых транзисторов, а также высокочастотных диодов, который практически уже достигнут. Это подтверждается косвенно и тем, что новые улучшения достигаются с очень большими затратами на разработку и производство приборов с лучшими параметрами. Например, появившиеся новые диоды Шоттки на высокое напряжение, разработанные на карбиде кремния (SiC), хотя и имеют высокое напряжение от 600 до 1200 В и токи от 10 до 20 А, однако они не только относительно дорогие, но также имеют несравненно худший (в 3,3 раза) параметр $U_F = 2\text{--}2,4$ В. Все сказанное подводит к мысли о том, что наблюдается технологический и научный предел существенного улучшения параметров основных силовых элементов импульсных ИВЭ.

Эволюция других компонентов, применяемых в импульсных ИВЭ

О ферромагнитных материалах для изготовления силовых трансформаторов ИВЭ уже было сказано выше. С 1988 по 2008 г. остаются лучшими в мире японские ферритовые сердечники материала РС-50 (Н704), которые на частотах 250–500 кГц имеют удельные потери $P_{уд} = 8\text{--}12$ Вт/кг при $\Delta B = 0,05\text{--}0,08$ Тл. Аналогичная картина, в части стабильности параметров, складывается и для материала, который используется в высокочастотных дросселях фильтров импульсных ИВЭ. Это молибденовый пермаллой марки МП140, МП250, который появился в 1980 г. и до сих пор является лучшим для сердечников дросселей, работающих в сильных полях. Некоторые надежды разработчики импульсных ИВЭ возлагали на использование сердечников из аморфных и нанокристаллических сплавов [5]. Однако фактически этот материал, имея превосходные качества для частот до 50–80 кГц в части удельных объемных потерь при относительно высоких значениях индукции $\Delta B = 0,2\text{--}0,4$ Тл, все же практически мало применяется в импульсных ИВЭ при рабочих частотах более 120 кГц. Кроме того, надо отметить, что технология изготовления сердечни-

ков из этих материалов достаточно сложная и дорогостоящая, хотя и хорошо отлаженная. Определенные проблемы есть у аморфных сплавов и с таким параметром, как долговечность, которая оценивается, по разным источникам, от 30–40 до 60 лет. Последнее обстоятельство в определенной степени ограничивает их применение в аппаратуре оборонного назначения, так как некоторые стратегические виды этой РЭА имеют срок эксплуатации 30–50 лет с заменой некоторых недолговечных компонентов. Очевидно, что силовой трансформатор не может просто заменяться в условиях ремонтных баз или после проведения очередных регламентных работ.

Так что и в этой части материалов и компонентов в силовых узлах импульсных ИВЭ имеется проблема с появлением нового поколения этих изделий. Только в устройствах управления (УУ), применяемых в импульсных источниках питания, появляются кардинальные сдвиги в сторону значительного улучшения их качества. Речь идет о применении в УУ микропроцессоров (микроконтроллеров), которые значительно расширяют функциональные возможности как в части отдельных функций управления и защиты силового ключа, так и для измерения и диагностики параметров ИВЭ. Применение микропроцессоров фактически (постепенно) делает излишней широкую номенклатуру большого количества специализированных микросхем управления для частного применения. В настоящее время для мощных импульсных источников питания от 1 до 10 кВт, а также в сложных системах и источниках бесперебойного питания ИБП (UPS) использование микропроцессоров оправданно, в том числе и с точки зрения снижения удельного показателя стоимости (\$/Вт). В то же время очевидно, что широкое внедрение микропроцессоров в импульсные ИВЭ — это одно из направлений бурного развития вычислительных и информационных технологий в последнее время.

Итоги эволюции импульсных ИВЭ как одного из направлений научно-технического прогресса

Проблемы эволюции устройств, преобразующих энергию

Необходимо отметить, что технические направления развития устройств, связанных с преобразованием энергии, всегда являлись довольно сложными. Это объяснялось тем, что процессы, в которых происходит изменение энергии при переходе из одного состояния в другое, принципиально обладают «затратной» по расходу мощности технологией, поэтому развитие этих направлений в технике имеет свою специфику. Она заключается в том, что в изделиях этого типа в любом случае при коммутации силового ключа всегда происходит выделение потерянной в процессе преобразования энергии. А это, в свою очередь, сопряжено с проблемой теплопередачи и, в конечном счете, влияет на долговечность и надежность всего изделия, в част-

ности, блока электропитания. Поэтому технический прогресс в этой области весьма консервативен. Если при развитии информационных технологий прогресс при появлении новых, революционных открытий дает порой гигантский скачок в их развитии, то в системах с преобразованием энергии, которая имеет место в импульсных источниках питания, мы можем наблюдать постепенный прогресс. Возможно, к настоящему времени он происходит по экспоненциальной кривой.

Действительно, появление цифровых методов обработки и накопления информации постепенно привело и приводит к практическому исчезновению массового использования аналоговых процессов. В настоящее время, например, можно представить синусоидальную кривую с помощью цифрового микропроцессора с практически любой степенью «гладкости». При этом количество точек дискретов микропроцессора может изменяться от 200 до 1000 и более. С другой стороны, как только технология хранения больших объемов информации перешла, например, от магнитной ленты к оптическому жесткому диску (HD), сразу же резко возрос удельный объем количества информации в новых носителях. Первые персональные компьютеры, например РС286, в 1985 г. имели объем «жесткого» диска примерно 50–100 Мбайт, а уже в 2000 г. его объем в персональных компьютерах достигал 60–80 Гбайт. В настоящее время «жесткий» диск даже в ноутбук величинной с одним том Советской энциклопедии может быть 300–400 Гбайт. Косвенно, но наглядно это показывает коэффициент эволюции в области информационных технологий, например в части объема HD ($K^{HD}_{эб}$): 300 Гбайт / 50 Мбайт = 6000 за 20–25 лет. К этому можно добавить $K^{CF}_{эб}$ — коэффициент эволюции в части изменения тактовой частоты (Clock Frequency) в центральных процессорах персональных компьютеров. Эта частота изменилась с 10–15 МГц в 1985 г. до 2,5–3,0 ГГц в 2005 г., то есть возросла в 200 раз ($K^{CF}_{эб} = 200$). Если ввести обозначение суммарного коэффициента эволюции для информационно-цифровых изделий (технологий) в виде $K^{им}_{эб, \Sigma} = K^{HD}_{эб} \times K^{CF}_{эб}$, то мы получим $K^{им}_{эб, \Sigma} = 6000 \times 200 = 1,2 \times 10^6$.

Для сравнения укажем, что КПД источников питания на электровакуумных приборах в 1965 г. мог составлять 0,3–0,5 (стабилизаторы напряжения) при сетевом питающем напряжении частоты до 1000 Гц. А уже в 2005 г. для мощных ИВЭ (1–3 кВт), работающих на частотах 150–200 кГц, КПД достиг значения 0,85–0,92. То есть КПД вырос примерно в 1,8–1,9 раза. Если применить термины коэффициентов эволюции (в части КПД ИВЭ — $K^{КПД}_{эб}$, а для частоты преобразования импульсных ИВЭ — $K^F_{эб}$), то мы увидим следующее: $K^{КПД}_{эб} = 1,9$, а $K^F_{эб} = 200$.

При этом дальнейшее увеличение КПД и частоты преобразования сопряжено с большими трудностями и затратами. Если взять за сравнение единицу удельной объемной мощности сетевых блоков питания, то в 1965 г. она в среднем была 8–12 Вт/дм³, а в 2005 г. этот показатель достиг 200–300 Вт/дм³ и более. Иными словами,

удельный показатель за это время вырос в 25 раз. Применяв обозначение коэффициента эволюции в части удельной объемной мощности ($K^{Pv}_{эб}$), получим $K^{Pv}_{эб} = 25$. Введя обозначение суммарного коэффициента эволюции импульсных ИВЭ в виде $K^{ИВЭ}_{эб, \Sigma} = K^{КПД}_{эб} \times K^F_{эб} \times K^{Pv}_{эб}$, получим $K^{ИВЭ}_{эб, \Sigma} = 1,9 \times 200 \times 25 = 9,5 \times 10^3$. При этом надо помнить, что импульсные методы преобразования в источниках питания были внедрены еще в 1965 г., то есть их эволюция продолжается уже более 40 лет.

Трудности ускорения научного прогресса в областях техники, связанных с преобразованием энергии, станут еще более очевидны, если обратить внимание на то, как изменялся транспорт, в частности железнодорожный. Началом развития железных дорог можно считать 1837 г., то есть этой области техники уже более 170 лет. Тем не менее средняя скорость перевозок изменилась от 20–30 км/час (для паровозной тяги) до 350–450 км/час (для скоростных поездов Франции, Германии, Японии и Китая) в настоящее время. То есть, скорость железнодорожного транспорта увеличилась в 15–20 раз. По существу, это иллюстрирует объективную причину медленного прогресса в отраслях, связанных с энергетическим преобразованием. Даже появление атомных источников энергии, например электростанций, которые в своем принципе используют новейшую технологию, связанную с ядерной реакцией, не привело к непосредственному преобразованию ядерной энергии в электрическую. Для этой цели в атомных электростанциях используют промежуточные звенья преобразования энергии, в основном паромеханические турбины с электрогенератором. Отметим, что принципиально эти оконечные устройства, применяемые на объектах атомных электростанций в цепи преобразования энергии от реактора до выработки электроэнергии, были известны еще в середине прошлого века.

Все это наводит на мысль, что, по-видимому, необходимы иные способы преобразования атомной, тепловой, солнечной, ветровой энергии в другие виды, альтернативные электрической. Хотя надо отметить имеющиеся достоинства последней, благодаря которым электричество успешно служит человечеству второй век.

Надо отметить, что уже давно известны изделия, где успешно применяются иные виды преобразований одного вида энергии в другой, минуя электрическую промежуточную фазу. Например, реактивный двигатель, пневматические и гидравлические устройства, криогенные системы и т. п. Даже применение древнейшего преобразования мышечной силы человека в механическую энергию, например в домкрате, позволяет подростку поднимать предметы массой более 1000 кг. Относительная легкость подъема заключается в том, что используется, например, червячная передача и земля в качестве точки опоры.

Возможно, близится к концу эпоха применения электрической энергии как основного средства для использования людьми на производстве и в быту.

Возможный путь дальнейшего прогресса в области разработки и производства импульсных ИВЭ

Ввиду малой вероятности в ближайшем будущем открытия принципиально нового силового ключевого элемента для ИВЭ авторы возвращаются к перспективному направлению в разработке и изготовлении блоков питания нового поколения. В основе его лежит использование самых совершенных технологий как силовой электроники, так и вычислительной техники, которое предложено и обобщено в статьях [6–8]. Импульсные ИВЭ, разработанные на основе силовых интеллектуальных унифицированных модулей высокой степени интеграции (SuperIPM — SIPM), будут работать на оптимальных частотах преобразования от 150 до 300 кГц, в зависимости от выходной мощности проектируемого блока питания.

Изложим основные преимущества и особенности этой, по существу системной, технологии в области разработки и производства ИВЭ:

1. Процесс разработки и изготовления новых блоков питания по заданным заказчиком техническим параметрам по существу будет аналогичен сборке нового компьютера на основе типовых серийноизготавливаемых узлов: интегрированных силовых модулей SIPM. При этом эти унифицированные модули по своим массо-габаритным и энергетическим показателям будут самыми лучшими для настоящего времени.
2. Применение этой технологии на порядок уменьшит потребность в массовом изготовлении дискретных компонентов для импульсных ИВЭ, что в настоящее время и в будущем позволит избежать значительных затрат ресурсов, материальных и финансовых.
3. Организация и архитектура всей вычислительной и управляющей системы, являющейся частью основного энергетического модуля и необходимой для силовых ключевых элементов, в том числе измерительные и диагностические узлы, может быть выполнена на основе применения микропроцессорных устройств.
4. Согласно предварительным расчетам, проведенным авторами, всего понадобится 4–6 базовых модификаций силовых модулей, среди которых, в частности, будут:
 - входной силовой выпрямитель с фильтром радиопомех и выпрямителем сетевого напряжения для варианта трехфазного сетевого напряжения;
 - аналогичный модуль с входным выпрямителем и узлом коррекции коэффициента мощности (PFC) с выходным фильтром постоянного напряжения, подаваемого на силовую преобразователь для варианта однофазного сетевого напряжения;
 - силовая преобразовательная часть, содержащая управляющий узел, транзисторный преобразователь с силовыми ключами и вспомогательными источниками питания;
 - силовой трансформатор для этого модуля будет разрабатываться и поставаться отдельно по техническому заданию заказчика. Для типовых выходных напря-

жений ИВЭ: 5, 12, 15, 27 В трансформатор может быть включен в схему модуля;

- выходной силовой высокочастотный выпрямитель и фильтр, содержащий силовые диоды, дроссели и конденсаторы. Для мощных низковольтных и сильноточных выходов блоков питания напряжением 2–5 В этот модуль может быть выполнен в виде активного коммутатора-выпрямителя (синхронного выпрямителя) на полевых транзисторах. Дроссель выходного высокочастотного выпрямителя также будет поставаться отдельно и разрабатываться по техническому заданию заказчика. Для типовых мощных выходных напряжений ИВЭ: 5, 12, 15, 27 В дроссель может входить в состав силового модуля.
5. Силовые интегрированные унифицированные модули SIPM будут выполняться в двух базовых типах исполнения:
 - для аппаратуры Заказчика, то есть оборонного назначения;
 - для аппаратуры коммерческого и промышленного назначения.

Заключение

Выполнен анализ эволюции импульсных ИВЭ в части схемотехники, компонентной базы с 1965 по 2005 г.:

- Показано, что электронный вид силового ключевого элемента в устройствах электропитания определяет возможности и схематические нюансы в процессе создания новых типов ИВЭ.
 - Достигнутый в конце 80-х годов высокий уровень параметров магнитных материалов для силовых высокочастотных трансформаторов и дросселей остается непревзойденным до 2009 г. В частности, речь идет о японских ферритах марок РС-50 (Н704), а также молибденовых пермаллоевых сердечниках, например отечественных марок МП140, МП250.
 - Проведенный анализ выявил наличие серьезной проблемы с появлением нового поколения материалов и компонентов, предназначенных для разработки высокочастотных моточных силовых узлов импульсных ИВЭ.
- Для количественной оценки степени эволюционного прогресса некоторых элементов и технических характеристик изделий потребительского спроса, в частности узлов и блоков средств электропитания, предложен метод расчета специального параметра. Суть метода — в определении условного значения какого-либо важного показателя изделия, который назван коэффициентом эволюции (прогресса) $K_{э}$. В результате расчетов этих коэффициентов компонентной базы для импульсных ИВЭ сделаны следующие выводы:
- в последнее время, очевидно, достигнуты предельные возможности улучшения важнейших параметров полевых транзисторов, таких как U_{DSS} , I_D , $R_{DS(on)}$;
 - намечается определенный потолок в улучшении параметров высокочастотных диодов Шоттки и Ultra Fast Diodes, который практически уже достигнут.

Наибольший прогресс достигнут в области информационно-цифровых технологий, ко-

эффициент эволюции которых $K_{э, \Sigma}^{им}$ с 1985 до 2009 г. для ряда параметров информационных изделий имеет значения $1,2 \times 10^6$, что на 2 порядка выше суммарного коэффициента эволюции $K_{э, \Sigma}^{ИВЭ}$ важнейших показателей ИВЭ, таких как КПД, частота преобразования и удельная объемная мощность.

Предложен радикальный путь дальнейшего развития импульсных источников питания, который заключается в технологии синтеза блоков питания с заданными параметрами на основе использования новых силовых интеллектуальных (интегрированных) унифицированных модулей.

В конце статьи авторы хотели бы подчеркнуть, что изложение истории эволюции импульсных ИВЭ — задача весьма сложная и ответственная. Поэтому в формате журнальной статьи невозможно более подробное изложение всех аспектов данной проблемы. В связи с этим авторы заранее согласны с тем, что возможно недостаточно полное отражение некоторых нюансов развития импульсных блоков питания. Однако, в свою очередь, авторы считали необходимым ознакомить всех специалистов по средствам электропитания с нашей версией процесса эволюции импульсных ИВЭ, так как в определенном (историческом) смысле авторы по существу своей профессиональной и научно-технической деятельности практически являлись непосредственными участниками описываемых событий и фактов.

Литература

1. Эраносян С., Ланцов В. Эволюция импульсных источников вторичного электропитания: от прошлого к будущему. Часть 5.1 // Силовая электроника. 2009. № 4.
2. Гинзбург А. И., Эраносян С. А. Опыт разработки системы стабилизации тока импульсного генератора СВЧ. Сб. Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия общетехническая XII. 1970. № 11.
3. Гинзбург А. И., Эраносян С. А. Передаточные функции некоторых схем транзисторных усилителей. Морское приборостроение. Серия VII Общетехническая. 1971. № 1.
4. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия. 1973.
5. Стародубцев Ю. Н., Белозеров В. Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: изд-во Уральского университета. 2002.
6. Эраносян С. А., Ланцов В. В. Интеллектуальные силовые модули для источников электропитания — один из путей возрождения отечественной микроэлектроники XXI века // Электрическое питание. 2005. № 1, 2.
7. Эраносян С. А., Ланцов В. В. Пути развития и архитектура отечественных интегрированных силовых модулей для импульсных источников вторичного электропитания // Электрическое питание. 2005. № 3, 4.
8. Эраносян С. А., Ланцов В. В. Разработка интегрированных силовых модулей и их применение в источниках вторичного электропитания // Современная электроника. 2006. № 8.