

Эволюция импульсных источников вторичного электропитания:

от прошлого к будущему. Часть 5.1

В статье подведены итоги эволюции нового класса импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭ), которые позволяют приступить к анализу путей совершенствования блоков питания. Рассмотрены характерные особенности развития импульсных ИВЭ как в историческом, так и в научно-техническом аспекте эволюции средств электропитания. Приведены особенности эволюции ИВЭ в части компонентной базы с 1965 по 2005 год. Отмечены причины роста научного потенциала как разработчиков импульсных ИВЭ, так и производителей компонентной базы средств электропитания. Подробно изложены итоги эволюции силового ключевого элемента, а также материалов и компонентов, применяемых в импульсных источниках нового класса. При этом особое внимание авторы уделяют тем компонентам, без которых невозможно проектировать высокочастотные преобразователи, применяемые в сетевых блоках питания нового класса.

Саркис Эраносян, к. т. н.

sergera840@mail.ru

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

В предыдущей статье [1] нами был завершен анализ основных и частных технических проблем, возникающих в процессе создания надежных импульсных сетевых блоков питания. Изложены основные концепции построения систем защиты по току основных силовых элементов транзисторного преобразователя. Подробно и аргументированно подтверждена необходимость введения в бестрансформаторные источники вторичного питания (БИВЭ) операции ограничения на безопасном уровне аварийного тока через силовые транзисторы при работе схем защиты от перегрузок по току в предельных режимах. Показаны особенности развития и применения отечественной и зарубежной компонентной базы, которая использовалась в процессе разработки БИВЭ в период с 1990 до 2005 г. Приведены основные тенденции совершенствования схем управления импульсных ИВЭ с учетом развития технологии их изготовления и миниатюризации компонентной базы.

Процесс развития импульсных источников питания

Для того чтобы более точно представить итоги эволюции импульсных ИВЭ с 1965 г. до наших дней, целесообразно провести их разносторонний анализ. Он позволит проследить общие пути научно-технического прогресса, обычно выявляемые при изучении процесса эволюции ИВЭ с разных позиций (граней) научно-технического мировоззрения в обществе. Следуя этим рассуждениям, рассмотрим развитие импульсных ИВЭ с различных сторон.

Исторический аспект эволюции ИВЭ

Как уже указывалось, общепринято началом развития импульсных ИВЭ считать 1960–1965 годы. В этот период в технике средств электропитания и вычислительной технике доминировали электровакуумные приборы. Причем в ключевом режиме они использовались, как правило, в схемах автогенераторов, блокинг-генераторов, а также в выпрямительных схемах начиная с мощностей 20–50 Вт вплоть до мощных ртутных выпрямителей (игнитроны, тиратроны т.п.). Последние использовались как для питания обмоток возбуждения двигателей постоянного тока, так и для силового управления скоростью вращения двигателя по цепи якоря.

Импульсные ИВЭ изначально применялись в аппаратуре оборонного назначения в качестве стабилизаторов напряжения или тока. Постепенно они пришли на смену линейным стабилизаторам на электровакуумных приборах. Наибольшее влияние и, можно сказать, толчок к широкому использованию импульсных ИВЭ был получен в начале 1960-х годов, когда появились первые полупроводниковые приборы — транзисторы и диоды. Некоторое время в качестве выпрямительных диодов применялись первые полупроводниковые селеновые выпрямители. Непосредственно с началом широкого использования полупроводниковой техники обнаружилось их несомненное преимущество перед электровакуумными приборами: они не требовали для своих номинальных режимов работы высоких напряжений (100–300 В), а также принципиально не имели обязательных для всех типов первых электровакуумных ламп специаль-

ных цепей накала. Собственно, благодаря последним в электровакуумных приборах и появлялось катодное излучение пучка электронов или других заряженных частиц, что давало возможность управлять потоком энергии (током) через анодные цепи электровакуумных ламп. После появления транзисторов управлять потоком энергии стало возможно и при относительно низких номинальных напряжениях — от 6–12 В до 80–100 В, что позволило добиться относительной безопасности и более высокой технологичности блоков питания. Обозревая историю, мы увидим, что в качестве основного регулирующего звена в импульсных ИВЭ в дальнейшем будет использоваться электронный (или магнитный) тип ключевого силового прибора. Поэтому справедливо утверждать, что тот или иной тип силового ключа диктует возможности и схематические нюансы в процессе развития импульсных ИВЭ. Отсюда следует, что эволюция импульсных ИВЭ в основном определяется эволюцией ключевого силового элемента. В соответствии с этим в импульсном ИВЭ естественно появление регулирующего элемента, выполненного в виде цепи, в которой в качестве основного прибора использовано последовательно-параллельное включение различных компонентов. Эти силовые компоненты, опуская первый элемент (электровакуумный), можно расположить в следующей очередности:

- магнитный усилитель (дроссель насыщения), используемый в основном в цепях переменного или пульсирующего тока;
- двухслойные и трехслойные полупроводниковые приборы: диоды и транзисторы, применимые в однополярных цепях. Но в последовательном соединении комбинация диод-транзистор может, например, использоваться в регулируемых системах напряжения на стороне как переменного тока, так и выпрямленного пульсирующего напряжения;
- четырехслойные приборы: тиристоры, симисторы (триаки). Отметим, что управляемые напряжением двухэлектродные приборы — динисторы — использовались, в основном, в цепях переменного тока или на стороне выпрямленного напряжения;
- синтезированные, интегральные приборы, позволяющие применять в одном изделии элементы, использующие разные виды преобразования энергии напряжения или тока. Среди них, в частности, упомянем оптоэлектронный прибор. Так, можно использовать в изделии силовой тиристор, включив в его цепь управления оптоэлектронный прибор. При этом ток, протекающий по цепи диода, позволяет в цепи фототранзистора сформировать развязанный от первичного тока импульс для запуска силового прибора (тиристора). Для гальванической развязки высоковольтной и низковольтной цепей от низкопотенциальной системы управления (например, в цепях обратной связи) применяются маломощные интегральные приборы, например, диодные и транзисторные оптроны.

В отдельный тип силовых ключевых приборов целесообразно выделить появившиеся в 1980–1990-х годах следующие приборы:

а) Полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET), позволившие значительно уменьшить энергию управления по сравнению с базовыми цепями биполярных транзисторов, а также заметно увеличить импульсные токи через транзистор. При этом ощутимо сократилось время переключения электронного ключа из запертого состояния в открытое (30–50 нс). В MOSFET-транзисторах отсутствует такой параметр биполярного транзистора, как время рассасывания избыточных (неосновных) носителей, накапливающихся, в основном, в базе силового транзистора. Следует отметить, что определенную инерционность при выключении полевой транзистор все же имеет: это объясняется тем, что в процессе его выключения необходимо некоторое время для разряда емкости Миллера (сток-затвор).

б) Транзистор IGBT — силовой ключ, основанный на соединении мощного биполярного транзистора (с Р-каналом) и полевого транзистора (с N-каналом), который служит для коммутации цепи управления силовым транзистором. К сожалению, в этой структуре присутствует проблема времени рассасывания, объясняемая специфическими свойствами любого биполярного транзистора. Это обстоятельство в значительной степени ограничивает частотные возможности данного прибора в импульсных источниках питания. В настоящее время частота его работы на практике составляет не более 50–100 кГц. В заключение изложим исторического аспекта эволюции импульсных ИВЭ отметим, что в настоящее время в той или иной степени применяются почти все виды ключевых приборов. Только каждый из них занял свою нишу. Так, и мощные, и запираемые тиристоры могут применяться в системах электропривода на 100–1000 кВт и более. В меньшей степени используются высокочастотные магнитные усилители, в ряде случаев применимые в мощных низковольтных (2–5 В) цепях на выходные токи 500–1000 А [2]. В основной массе импульсных ИВЭ различной мощности (от десятков до тысяч Вт) применяются полевые транзисторы, работающие на частотах 150–300 кГц.

Научно-технический аспект эволюции ИВЭ

Особенности эволюции компонентной базы ИВЭ

С самого начала 1960-х годов между разработчиками импульсных ИВЭ и проектировщиками электронных и магнитных компонентов существовала тесная взаимосвязь. Разработчики блоков питания ставили перед изготовителями компонентов задачи по получению новых магнитных материалов или электронных приборов. При этом, получая новинки, разработчики зачастую обнаруживали в них новые перспективные возможности, благодаря которым можно было добиться более высоких потребительских свойств блоков питания. С другой стороны, требования изготовителей компонентов для импульсных ИВЭ «вынуждали» разработчиков переходить к новым видам

импульсных источников питания. Так, общеизвестен факт отказа производителями телевизоров (когда их производство во всем мире стало исчисляться десятками миллионов штук в год) от массового применения в этих изделиях низкочастотных сетевых трансформаторов. Такое требование было вызвано не только тем, что эти трансформаторы значительно увеличивали габариты и вес телевизионных приемников, но и увеличением стоимости изделий в целом (происходил непрерывный рост мировых цен на медь, связанный, в частности, с дефицитом этого материала). Выходом из положения стала замена низкочастотных трансформаторов (50, 60, 400 Гц и т. д.) на высокочастотные (десятки-сотни кГц), в которых содержание меди было на несколько порядков меньше. Собственно, этот шаг и привел к окончательному массовому внедрению бестрансформаторных сетевых ИВЭ, основанных на высокочастотном преобразователе, питающемся непосредственно от выпрямленного сетевого напряжения. В сумме эти обстоятельства привели к значительному прогрессу в разработке электронных компонентов для блоков питания. Речь идет в первую очередь о высокочастотных транзисторах и быстродействующих диодах, основанных на барьере Шоттки, и fast-диодах (так называемых «диодах с тонкой базой», Fast Recovery диодах).

Другой пример взаимовлияния разработчиков импульсных ИВЭ, изготовителей функциональных изделий РЭА и бытовой техники и изготовителей компонентов заключался в следующем. При повышении частот преобразования в импульсных ИВЭ с 3 до 20 кГц оказалось, что в условиях массового производства широко применяемые для трансформаторов (в 1960–1975 годы) пермаллоевые сплавы оказались неприемлемо дороги. Это объяснялось сложностью технологии получения тонкой (15–30 мкм) ленты, а также последующих процессов отжига и намагничивания, нанесения слоя изоляции на ленту и, наконец, собственно «намоткой» сердечника. В завершение этого процесса необходимо было поместить сердечник в контейнер, который заливался специальным компаундом. Применение в оборонных отраслях таких магнитопроводов было оправданно, несмотря на их дороговизну. Однако для изделий широкого потребления цена такого сердечника была слишком высока. Научные поиски привели к появлению новых ферритовых сердечников, которые изготавливались путем «спекания» порошкового материала в специальных пресс-формах. Таким образом магнитопроводом можно было придать практически любую форму. В условиях производства (десятки-сотни тысяч штук) их цена могла быть достаточно низкой.

Впрочем, следует отметить, что по своим магнитным свойствам и удельным потерям в материале пермаллоевые сплавы с толщиной ленты 15 мкм при частотах работы от 5 до 15 кГц не уступали ферритовым сердечникам. Даже материал 79НМ имел индукцию насыщения 0,7 Тл, что почти в 3 раза выше, чем аналогичный параметр у ферритов. Например, силовой трансформатор на сердечнике 79НМ,

разработанный в 1972 г. в ЦНИИ «Гранит» (Ленинград), при работе на частоте 6,5 кГц в блоке с выходной мощностью 400 Вт имел удельную мощность $P_{уд} = 400 \text{ Вт/дм}^3$. А трансформатор на ферритовом сердечнике, разработанный в ОКБ «Радуга» (также Ленинград) в 1978 г., работающий на частоте 20 кГц в блоке мощностью 80 Вт, имел тот же удельный показатель. Это демонстрирует несомненные достоинства материала 79НМ, так как чем выше частота работы, тем обычно значительно выше удельная мощность трансформатора. Заметим, что в этой удельной характеристике оценивается не габаритная мощность трансформатора, а удельная мощность согласно формуле $P_{уд} = P_n/V_{тр}$, где P_n — номинальная выходная мощность блока питания в Вт, в котором работает этот трансформатор, а $V_{тр}$ — его объем в дм^3 .

Рост научного потенциала разработчиков ИВЭ и компонентов

Другой важной особенностью эволюции импульсных ИВЭ является непрерывный рост научного потенциала как разработчиков ИВЭ, так и разработчиков важнейших компонентов средств электропитания. Это объясняется не только непрерывно возрастающей сложностью импульсных источников питания, но также практически непрерывным увеличением частоты работы силового ключевого элемента с 3–5 до 150–300 кГц. При этом разработчикам импульсных ИВЭ зачастую приходилось решать сложные задачи по обеспечению устойчивости системы регулирования силового преобразования энергии в блоке питания. Стремление улучшить массогабаритные характеристики импульсных ИВЭ привело к созданию БИВЭ с высокочастотными преобразователями, работающими на частоте 150 кГц. В 1975 г. сетевые блоки питания с импульсными ключевыми стабилизаторами в лучших случаях имели $P_{уд} = 25 \text{ Вт/дм}^3$. В настоящее время лучшие образцы БИВЭ имеют $P_{уд} = 250\text{--}350 \text{ Вт/дм}^3$ и более — при выходных мощностях блока питания 800–2000 Вт.

Значительному росту профессионализма разработчиков импульсных ИВЭ способствовала также эффективная система получения, обработки и обмена информацией, сложившаяся к 1970 г. в СССР. Основные особенности этой системы заключались в следующем.

- В каждом крупном научно-техническом учреждении (ЦНИИ, НИИ, ОКБ) имелся отдел или бюро информации (ОНТИ). В них, как правило, входили патентный отдел, группа переводчиков и т. п. Подразделения ОНТИ получали новейшую информацию от центрального института научно-технической информации (Москва) в виде перечня с аннотациями вновь изданных книг, периодических журналов и других видов печатной продукции, в том числе и патентной информации. В головные институты основных девяти министерств и в другие крупные учреждения, а также производственные объединения поступали образцы книг и перечни аннотированных библиографических ссылок. Все это — в соот-

ветствии с определенной тематикой (видом отрасли промышленности), причем данная информация обновлялась не реже одного раза в месяц. Далее на местах в библиотеки приходили специальные представители отделов или лабораторий, делавшие соответствующие выписки по своим направлениям техники. Затем в отдельных коллективах они докладывали о новинках периодической печати — как отечественной, так и зарубежной. После анализа полученной информации принималось решение о запросе необходимых информационных материалов через ОНТИ из центрального фонда в Москве или других учреждений. Система работала практически без сбоев, можно было получить нужный источник информации примерно в течение одного месяца после отправки запроса.

- Активному обмену новейшими достижениями способствовало регулярное проведение научно-технических конференций и семинаров по отраслям техники и науки. В части разработки средств электропитания в Ленинграде раз в два года проводилась специальная конференция разработчиков ИВЭ. Начиная с 1968 г. в Киеве раз в 4 года стали проводиться всесоюзные конференции по преобразовательной технике. Каждый из участников мероприятий мог приобрести книги с тезисами всех докладов. Также проводились специальные семинары для ведущих специалистов по средствам электропитания, которые организовывались, как правило, головными ЦНИИ и учреждениями представителя заказчика. Например, большой популярностью среди инженеров и научных работников пользовались семинары в Москве в Доме научно-технической пропаганды (ДНТП), в Ереване в институте математических машин (ЕРНИИММ), а также в Минске, Вильнюсе, Севастополе, Мытищах и т. д. Причем на эти конференции и семинары обязательно приглашались разработчики всех компонентов и материалов, необходимых при производстве ИВЭ, — от изготовителей полупроводниковых приборов, конденсаторов и резьбем до разработчиков новых технологических материалов и оборудования. Таким образом, специалисты — разработчики ИВЭ и силовых преобразователей — были в курсе всех новых приборов, материалов и направлений в технике и технологии как в части проектирования изделий, так и процесса изготовления и настройки различных узлов и систем электропитания.

Необходимо также отметить, что если некоторые публикации зарубежной прессы представляли интерес для специалистов, то материал (например, статья или патент) направлялся в ОНТИ для перевода. Например, в ЦНИИ «Гранит» были штатные переводчики по основным техническим языкам: английский, немецкий, японский. Если возникала необходимость перевода с другого языка, то использовались штатные переводчики из Ленинградского государственного университета. После перевода текста материал направлялся специалисту по этому направлению техники для редактирования и уточне-

ния некоторых нюансов перевода. Далее этот материал передавался в типографию предприятия и печатался под специальным номером. Один экземпляр отправлялся в Москву, куда поступали переводы практически из любых источников зарубежной информации, выполнявшиеся ОНТИ. Также все заинтересованные предприятия централизованно оповещались о том, что появился новый перевод и он опубликован в соответствующем источнике информации. Кроме того, регулярно выпускались аннотированные указатели новых переводов по рубрикам техники. В качестве иллюстрации эффективности функционирования такой системы информации приведем перечень событий и публикаций, который имел место в ЦНИИ «Гранит» в 1969–1971 годах при разработке мощного блока питания для модулятора СВЧ-передатчика (200 В, 4 А). События развивались следующим образом:

- В 1968 г. в СССР появились опытные образцы тиристоров (УД63, УД64) с допустимым напряжением 300–400 В на ток 10 А.
- В 1969 г. при разработке регулируемого выпрямителя, питающегося от сети 400 Гц, было обнаружено явление подмагничивания сердечника силового трансформатора в схеме, где в первичной сети были установлены два встречно-включенных параллельных тиристора, через которые напряжение подавалось на силовой трансформатор. При этом вторичная обмотка трансформатора была нагружена на выпрямитель с индуктивной реакцией фильтра. Возникающий в этой схеме процесс подмагничивания трансформатора практически приводил к аварийным режимам, то есть по существу схема оказалась неработоспособной. Кстати, в этот же момент времени было выпущено первое издание книги [3]: «Тиристоры, технический справочник фирмы General Electric». Так вот, в этой книге схему с тиристорами на стороне сетевого напряжения, которая имела индуктивный фильтр во вторичной обмотке силового трансформатора, добросовестные американские инженеры не опубликовали. Это подтверждает наличие серьезных проблем для реализации схем этого типа.
- В 1966 г. в США известный специалист по магнитным усилителям Герберт Сторм (H. F. Storm) зарегистрировал патент «Использование симметричных устройств в силовых цепях переменного тока с регулируемой фазой» [4]. В нем было подтверждено, что этот тип тиристорных регуляторов хронически «страдает» наличием явления подмагничивания сердечника силового трансформатора. С другой стороны, для управления тиристорами в разрабатываемом блоке питания было использовано фазосдвигающее устройство (ФСУ), выполненное на основе транзисторного аналога однопереходного транзистора (УПТ).
- К этому времени в 1968 г. в США была опубликована статья о возможностях использования УПТ [5].
- Далее в ЦНИИ «Гранит» одним из авторов статьи и ведущим специалистом, к.т.н. Гинзбургом А.И., был подробно

описан процесс подмагничивания сердечника силового трансформатора [6]. При этом было доказано решающее влияние на этот процесс индуктивности рассеяния силового трансформатора L_s и активного сопротивления вторичной обмотки трансформатора.

- Затем была предложена конкретная схема устранения подмагничивания, которая оказалась значительно проще, чем предложенная в патенте [4].

В результате проведенных исследований, а также анализа всей имеющейся информации, в 1970 г. появился блок питания, в котором нашли отражение все новые идеи и схемы, передовые на тот период времени. Этот блок обеспечивал электропитание модулятора, с помощью которого была решена задача устойчивой работы системы стабилизации тока магнетрона СВЧ-передатчика [7].

Приведенный пример наглядно иллюстрирует пользу активного получения и применения научно-технической информации в мире, а также эффективность действовавшей в СССР системы научно-технической информации, в том числе и для специалистов по средствам электропитания.

Все эти меры, организационные и административные, привели к тому, что к середине 1980-годов оформились научные школы (коллективы специалистов) в области силовой электроники, которые были сосредоточены как в головных НИИ и КБ, так и в ведущих университетах и институтах. В основном научные школы располагались в крупных городах СССР, таких как Москва, Ленинград, Минск, Киев, Ереван, Вильнюс, Томск, Новосибирск, Рязань, Ростов, Нижний Новгород (Горький), Екатеринбург (Свердловск) и др. Разумеется, при этом появилась и определенная техническая специализация этих научных школ. Так, например, в московском АКБ «Якорь» работали специалисты по системам электропривода

малых и средних машин. В Киеве в Институте электродинамики сложилась сильная школа по индуктивно-емкостным преобразователям средней и большой мощности, а в Ереване были сосредоточены специалисты по электропитанию больших ЭВМ серии ЕС и т. д. На всесоюзные конференции съезжались от 250 до 400 специалистов по средствам электропитания. Также в это время был образован институт главных конструкторов по системам вторичного электропитания различных направлений техники, которые были «привязаны» к РЭА соответствующего министерства. Эти авторитетные специалисты разных отраслей активно сотрудничали друг с другом для выработки общих направлений развития техники и технологий, подготавливали специальные предложения и обращения в Правительство СССР от имени участников научной конференции (например, с целью разработки новых электронных или магнитных материалов, компонентов и т. п.).

В конце 1980 г. в Москве была образована Ассоциация разработчиков и производителей источников электропитания, которая, несмотря на небольшое финансирование, пыталась выполнить роль координатора по объединению усилий по созданию эффективных импульсных источников питания. Возглавляли эту Ассоциацию видные специалисты по средствам электропитания Алешин И.Е. и Заика П.Н.

Заключение

1. Рассмотрен исторический аспект эволюции ИВЭ, который показал, что тип силового ключа определяет возможности и схематические нюансы в процессе развития импульсных блоков питания.
2. Проведен анализ совершенствования импульсных ИВЭ с точки зрения процесса роста научно-технической эрудиции разработчиков импульсных ИВЭ и производи-

телей компонентной базы средств электропитания.

3. Подчеркнута особая роль (влияние) системы получения и обмена информацией на достигнутые успехи за время эволюции импульсных ИВЭ, которые позволяли получать качество разрабатываемых блоков питания на уровне лучших зарубежных образцов. Эффективность действовавшей в СССР системы активного получения и применения научно-технической информации была известна во всех странах Запада.

Окончание следует

Литература

1. Эраносян С., Ланцов В. Эволюция импульсных источников вторичного электропитания: от прошлого к будущему. Часть 4 // Силовая электроника. 2009. № 3.
2. Mkrtchian J. A., Reznikov L. N., Mkrtchian A. J. The water-cooled heavy-current power supply units. INTELEC'95, 1995 (Труды конференции 1995 IEEE, Гаага, Нидерланды. 1995).
3. Тиристоры. (Технический справочник) Пер. с англ. под ред. Лабунцова В. А., Обухова С. Г., Свиридова А. Ф. Изд. 2-е, доп. М. Энергия, 1971.
4. Patent USA №3348128. Oct.17, 1964. Cl 323-4.
5. Marston R. M. 20 Unijunction Transistor Applications. Radio — Electronics, № Т — 6, № Т — 7, 1968.
6. Гинзбург А. И., Эраносян С. А. Подмагничивание трансформатора в тиристорном выпрямителе с индуктивным фильтром. Морское приборостроение. Серия VI I Общетеchnическая, вып. 9. 1971.
7. Гинзбург А. И., Эраносян С. А. Опыт разработки системы стабилизации тока импульсного генератора СВЧ. Сб. Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия общетеchnическая XI, №21, 1970.