

# Эволюция импульсных источников вторичного электропитания:

от прошлого к будущему. Часть 1

**В данной статье в кратком изложении дается история развития импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭ). Анализируются особенности построения импульсных ИВЭ по мере их развития: структуры блоков питания, схемотехнические решения, компонентная электронная база, конструктивно-технологические решения. Обращается внимание на общие закономерности и подводятся итоги развития импульсных ИВЭ начиная с 1950 года. Подчеркивается, что постоянное улучшение параметров блоков питания в части массо-габаритных показателей, экономичности и надежности есть результат их исторического развития. Это стало возможно, в основном, благодаря применению в ИВЭ более совершенных изделий электронной техники. Прежде всего, это относится к новым типам полупроводниковых и магнитных ключевых приборов, а также к усовершенствованию ферромагнитных материалов, применяемых в средствах электропитания. Сформулированы выводы о тенденциях развития импульсных ИВЭ.**

**Саркис Эраносян, к. т. н.**

sergera840@mail.ru

**Владимир Ланцов**

vvlantsov@list.ru

В настоящее время импульсные источники вторичного электропитания (ИВЭ) получили широкое распространение. Они занимают практически 90% мирового рынка всех изготавливаемых ИВЭ. Преобладающее влияние в этом направлении оказали и продолжают оказывать потребности бурно развивающихся отраслей: телекоммуникаций, компьютерной техники и компьютерных технологий, силовой электроники, автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), разного промышленного оборудования и аппаратуры военного назначения. Постоянно улучшаются различные показатели назначения импульсных ИВЭ: растут выходная мощность, коэффициент полезного действия (КПД), надежность, улучшаются и массо-габаритные показатели, электромагнитная совместимость. В частности, в настоящее время диапазон выходных мощностей современных импульсных ИВЭ с сетевым входом (сокращенно АС/DC) составляет от 5–10 Вт до 5–10 кВт и более. Величина КПД реально достигает 70–90% в зависимости от структуры (однотактные АС/DC или двухтактные АС/DC) и типа первичного питания (однофазная или трехфазная сеть переменного тока). Максимальные значения удельной мощности («энергетической плотности»)  $p_v$  по объему у АС/DC-преобразователей составляют  $p_v \geq 250\text{--}500$  Вт/дм<sup>3</sup>, а по массе —  $p_m = 200\text{--}400$  Вт/кг.

Для анализа состояния импульсных ИВЭ и прогноза на будущее целесообразно предварительно кратко ознакомиться с историей их развития.

## Основные этапы развития импульсных источников питания

Рассмотрим вкратце эволюцию импульсных ИВЭ с момента их зарождения. При описании основных этапов развития импульсных источников основное внимание будет уделено эволюции отечественных ИВЭ, свидетелями и участниками которой были и авторы настоящей статьи. Кроме того, при изложении материала более подробно будут рассмотрены основные этапы развития АС/DC-преобразователей. Это связано с тем, что преобразователи постоянного напряжения в постоянное (DC/DC) — это составная часть АС/DC, а последние, в свою очередь, являются составной частью более сложных систем и источников электропитания, например источников гарантированного или бесперебойного питания. Для общности изложения оценку и приводимые примеры будем в большей степени соотносить с основной массой серийно выпускаемых (не заказных) АС/DC-преобразователей коммерческого и/или промышленного назначения с питанием от сети переменного тока напряжением ~220/230 В частоты 50/60 Гц. Сделав такое краткое введение, переходим к изло-

жению основных этапов эволюции импульсных ИВЭ.

По информации авторов, упоминания о некоторых видах импульсных ИВЭ (переключаемых источниках питания, или Switch Mode Power Supplies — SMPS), относятся к 1940-м годам [1]. В то время, в частности, в маломощных источниках с электропитанием от гальванических батарей и аккумуляторов в качестве ключей использовался электромагнитный прерыватель-вибратор. На его основе создавались вибрационные преобразователи (ВБ) [2]. ВБ работали от аккумуляторов (напряжением до 24 В на мощность до 250 Вт) и от сети переменного тока (на мощность до 750 Вт). Чаще всего вибраторы изготавливались на частоту 100 Гц, но иногда и на повышенную частоту (200–400 Гц). По своей структуре ВБ представляли собой ключевые преобразователи или инверторы, предназначенные для получения более высокого напряжения постоянного или переменного тока. Естественно, их массо-габаритные показатели и надежность были низкие. В то время радиоэлектронная аппаратура (РЭА), включая электронно-вычислительные машины (ЭВМ), была выполнена на электронных лампах. Аппаратура на лампах требовала для своего электропитания источники с напряжением в сотни вольт, но при сравнительно небольших токах (десятки миллиампер, иногда единицы ампер). В 1950-х годах в источниках питания повышенной и большой мощности с успехом использовались регуляторы и преобразователи на тиратронах, которые работали уже на повышенной частоте: сотни герц — единицы килогерц. Тиратрон — трехэлектродный управляемый ионный прибор дугового разряда с положительной пусковой характеристикой. В качестве диодов использовались селеновые и электровакуумные (кенотроны) выпрямители. В этом случае КПД, массо-габаритные показатели и надежность также не были высокими.

После разработанного американским физиком Шокли [3] в 1953 году биполярного плоскостного транзистора и раскрытия «тайн» *p-n*-перехода полупроводникового прибора началась эпоха их массового применения. Благодаря этому в РЭА вместо электронных ламп стали все более широко использоваться полупроводниковые транзисторы и диоды: вначале германиевые, а затем кремниевые. Применение полупроводниковых приборов потребовало изменения номенклатуры источников питания, которые обеспечивали бы на выходе низкие напряжения (до 60 В), но на большие токи (единицы — десятки ампер).

### Развитие импульсных источников питания в 1950–1960 гг.

Наиболее распространенные в этот период мощные германиевые PNP-транзисторы по технологии изготовления были сплавными. По параметрам они были низковольтными (максимальное постоянное напряжение коллектор — эмиттер  $U_{CE0} = -45 \dots -60$  В) и низкочастотными (граничная частота в схеме с общей базой, ОБ, — не более 100–150 кГц). Вели-

чина максимального коллекторного тока  $I_C$  составляла 5–15 А. Поэтому, кроме линейных стабилизаторов, они в основном использовались в понижающих импульсных (ключевых) стабилизаторах напряжения (КСН) и в преобразователях от сети 12–27 В. Из отечественных транзисторов того времени укажем германиевые низкочастотные PNP-транзисторы типа П210, П216, П217, а также кремниевые транзисторы типа П302–П304 на напряжение 40–80 В и ток до 0,4 А [4]. Хотя эти транзисторы были универсальными, предназначенными в том числе и для использования в переключающих устройствах, тем не менее, в справочных данных не приводились значения параметров их быстродействия. Поэтому разработчику приходилось самому экспериментально определять параметры быстродействия этих транзисторов.

Развязка от сетевого переменного напряжения  $\sim 115$  В /  $\sim 220$  (230) В частоты 50 (60, 400, 1000) Гц производилась с помощью низкочастотного сетевого трансформатора с последующим низковольтным выпрямителем (выпрямителями). Частота коммутации силового транзистора в первоначально составляла 3–5 кГц. Импульсные стабилизаторы выполнялись как релейного типа, так и по схеме с ШИМ или частотным управлением. В схемах управления использовались маломощные дискретные транзисторы и диоды, а также импульсные трансформаторы. На подвижных объектах специального назначения (например, в авиации и на флоте) для первичного электропитания применялось также сетевое напряжение  $\sim 115$  В /  $\sim 220$  (230) В повышенной частоты (400, 500, 1000 Гц), что позволяло значительно улучшить удельные массо-габаритные показатели источников питания.

Для случая блоков питания большой мощности в регулируемых выпрямителях и инверторах в качестве силовых ключей ранее использовался тиратрон [5]. Потом стали применять вначале магнитные усилители, а затем тиристоры, которые могли коммутировать напряжения в сотни вольт и токи в единицы — десятки ампер и более. Это, конечно, было шагом вперед и позволяло создавать импульсные блоки питания с современной структурой: сетевой выпрямитель — инвертор — низковольтный выпрямитель. Основные недостатки преобразователей на тиристорах — это низкая частота переключения (не более единиц килогерц), сложная схема управления, из-за проблем с запирающим при работе в звене постоянного тока, а также влияние (возрастание) электромагнитных помех (ЭМП) на устойчивость работы всего комплекса РЭА.

На ускоренное развитие магнитных усилителей (МУ) в 1950–1960 гг. повлияло, по крайней мере, два обстоятельства: первое — это появление оригинальных ферросплавов для получения новых ферромагнитных свойств магнитопроводов, например, для снижения потерь в трансформаторах и дросселях, второе — стремление разработчиков повысить частоту преобразования от 100 Гц в электромагнитных прерывателях ВБ до устройств с частотами преобразования 400–2000 Гц, ра-

ботающих на тиратронах. Например, в регуляторах и стабилизаторах напряжения большой мощности в качестве силовых ключей широко использовались магнитные ключи, выполненные на ленточных сердечниках. Эти сердечники формировались из тонколистовых сплавов железо-никель-кобальт (пермаллой) с толщиной ленты 0,01–0,1 мм. При этом коэффициент прямоугольности ( $K_{пн}$ ) материала сердечника был не менее 0,85–0,92 для «прямоугольной» петли гистерезиса и  $K_{пн} = 0,65–0,75$  — для «наклонной» петли. Такие сердечники имели индукцию насыщения от 0,75 до 1,5 Тл в зависимости от марки сплава и степени прямоугольности. На частотах работы от 5,0 до 50 кГц в ряде случаев сердечники из этих материалов имели хорошие значения удельных потерь —  $P_v$  Вт/кг. Например, потери в сердечнике 79НМ с толщиной ленты 0,05 мм нормировались на уровне 13,0 Вт/кг на частоте 10 кГц при индукции 0,5 Тл, а для материала 34НМКП (лента 0,02 мм) потери нормировались на уровне 65,0 Вт/кг на частоте 50 кГц при индукции 0,5 Тл. Именно на этих магнитопроводах работали различные ключевые устройства, например, магнитные усилители, достаточно распространенные в то время, в том числе для мощных систем автоматического управления.

Стабилизатор на магнитных силовых ключах по своей структуре практически аналогичен импульсному стабилизатору напряжения: силовой ключ (ключи), замыкающий диод, LC-фильтр. Отличие в том, что стабилизатор на МУ питается от переменного напряжения, а ключ работает на этой же частоте. В связи с этим выигрыш в массо-габаритных показателях очевиден при использовании повышенной частоты питающего напряжения (400, 500, 1000 Гц), что было характерно для систем электропитания передвижных объектов.

В те годы в ЦНИИ «Электроприбор» одним из авторов статьи был разработан блок питания с выходной мощностью 450 Вт. В этом блоке, предназначенном для вычислительного комплекса на транзисторных токовых переключателях (прообраз будущей эмиттерно-связанной логики — ЭСЛ), были использованы такие магнитные компоненты. Питание блока производилось от напряжения  $\sim 220$  В, 500 Гц, применяемого для электропитания корабельной аппаратуры. При этом наиболее мощные выходные стабилизированные каналы (+6 В/30 А, –6 В/20 А) были выполнены с использованием магнитных ключей на ленточных пермалловых сердечниках. Надо отметить, что такие стабилизаторы были на порядок надежнее полупроводниковых стабилизаторов того времени. Кроме того, они не «боятся» ионизирующих излучений (радиации).

Другим важным преимуществом магнитного усилителя является гальваническая развязка цепи управления, усилителя обратной связи, от силового, сетевого ключа, так как обмотка (обмотки) управления полностью автономны. В то же время управляющие обмотки одновременно магнитно связаны с двумя сердечниками, на которых намотаны силовые обмотки, работающие каждая в своем полупериоде сети (например, в двухтактном МУ).

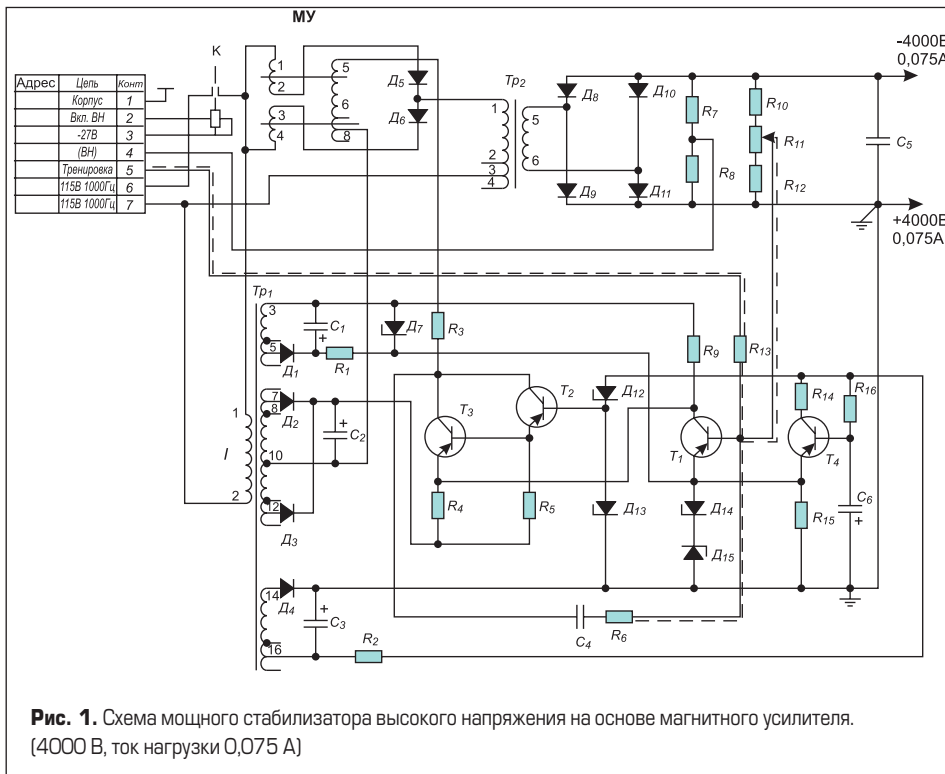


Рис. 1. Схема мощного стабилизатора высокого напряжения на основе магнитного усилителя. (4000 В, ток нагрузки 0,075 А)

В качестве примера можно привести высоковольтный бортовой стабилизатор напряжения мощностью 300 Вт, разработанный в ЦНИИ «Гранит» под руководством известного специалиста по блокам питания к. т. н. А. И. Гинзбурга в 1965 году. Этот блок питался от сети 115 В, 1000 Гц. Схема высоковольтного стабилизатора представлена на рис. 1

Силовая часть состоит из регулирующего органа МУ, собранного по схеме дросселя с самонасыщением и выходом на переменном токе через диоды Д5, Д6, к которым подключен силовой высоковольтный трансформатор Тр<sub>2</sub>. Его вторичная обмотка соединена с высоковольтным (-4000 В, 0,075 А) выпрямителем на диодах Д8–Д11 с емкостным фильтром С5. Обратная связь подается с делителя напряжения R10–R12, относительно заземленного вывода (+4000 В), на усилительный каскад на транзисторе Т1, который обеспечивает через усилители мощности Т2, Т3 изменение тока в обмотке управления МУ. Схема формирует плавный подъем выходного напряжения в течение 5 с от нуля до номинального напряжения. Этот подъем задается работой транзистора Т4, потенциал базы которого определяется зарядом конденсатора С6. В схеме также предусмотрена возможность изменять выходное напряжение блока в пределах 1,5–4 кВ при подаче внешнего регулируемого напряжения (-20 В, клемма разъема 5). Последний режим предназначен для «тренировки» высокочастотного блока передатчика. Сердечник МУ выполнен на кольце ОЛ 40/64-16, материал — сталь 50НП, лента 0,05 мм. Напряжение под нагрузкой в первичной обмотке Тр<sub>2</sub> — 70 В, а на вторичной — до 4000 В. Данный бортовой блок питания имел удельную массо-габаритную характеристику  $p_v$  порядка 37 Вт/дм<sup>3</sup>.

Удивительно, насколько быстро распространялись новые научные и инженерные идеи! Причем очередность всегда была следующая: вначале в институтах и на заводах военно-про-

мышленного комплекса (ВПК), а затем в институтах и на заводах «открытых» отраслей экономики СССР. Действительно, если обратиться к хронологии, то можно увидеть следующее: 1954–1955 гг. — Hebert F. Storm выпускает фундаментальный труд по теории магнитных усилителей [6]; с 1956 по 1967 г. происходит активное внедрение и серийное производство блоков питания в системе ВПК. С 1958 по 1968 г. магнитные усилители уже применяются во многих отраслях силовой электротехники и машиностроения [7]. В частности, в системах электропривода магнитные усилители успешно заменяют электромашинные усилители, на основе серийно выпускаемых унифицированных приборов [8] (ТУМ, УМП и др.). Следует подчеркнуть, что до сих пор можно найти приборы и блоки на основе МУ, выпускаемые по заказу или серийно, которые содержат современную элементную базу. В этих оригинальных блоках МУ работает на частотах 20–100 кГц.

В статье [9] крупного специалиста по системам и блокам электропитания д. т. н. Ж. А. Мкртчяна описаны одноканальные блоки питания для сверхмощного компьютера. Они имеют следующие параметры: выходное напряжение/ток нагрузки — 5 В/800 А, 2 В/800 А, КПД — 82% и 60% соответственно, входное напряжение 380/220 В (+10%, -15%), 45–65 Гц, удельная объемная мощность  $p_v = 470$  Вт/дм<sup>3</sup> и 188 Вт/дм<sup>3</sup> соответственно. Основная особенность этих блоков заключается в том, что последовательно с мощным силовым транзисторным ключом, работающим на частоте 25 кГц, был включен магнитный усилитель. Это позволило вначале осуществлять «бестоковое» включение силового транзистора, а потом коммутировать силовой ток с помощью МУ. Выключение силового транзистора также «бестоковое», таким образом, в транзисторах практически отсутствуют динамические потери.

Большой вклад в создание импульсных ИВЭ на основе магнитных усилителей, а также систем электропривода внесли известные отечественные специалисты по средствам электропитания: А. И. Гинзбург, М. А. Розенблат, В. И. Лапиров-Скобло, Р. Х. Бальян, Б. Н. Иванчук, Л. А. Краус, Ж. А. Мкртчян, К. Б. Мазель, Н. П. Васильева, Т. Х. Стефанович и др.

Как уже было отмечено, «господство» магнитных усилителей в системах и блоках электропитания в основном утвердилось к 1960 году. Практически в то же время, с 1956 года [10], бурно развивалось новое направление, основанное на четырехслойных полупроводниковых ключевых приборах — тиристорах. Завершением теоретических публикаций за рубежом было издание фундаментальной работы [11]. В СССР первые подробные публикации по теории и практике применения тиристорных инверторов и регулируемых выпрямителей для блоков питания начали появляться с 1962 года [12, 13].

Отметим еще раз определенную закономерность в хронологии освоения в оборонной и общепромышленной аппаратуре новых достижений за рубежом и в нашей стране. Для магнитных усилителей на Западе их широкое внедрение происходило в 1958–1960 гг., а в СССР — в 1961–1965 гг., причем надо признать, что отечественные магнитные материалы для МУ практически не уступали по характеристикам зарубежным, а в некоторых случаях были и лучше. Это подтверждается сравнением зарубежных бортовых стабилизаторов для передающих радиоустройств с нашими приборами аналогичного назначения, которые серийно выпускались в 1962–1965 гг.

Что касается внедрения тиристорных устройств в РЭА ВПК и в приборы общепромышленного силового электротехнического оборудования, то можно увидеть, что на Западе тиристоры применялись очень широко уже в 1959–1962 гг. [14]. В СССР это направление техники нашло широкое распространение в 1966–1970 гг. Как видно, запаздывание в применении тиристорных, по сравнению с освоением МУ, получается значительно больше — примерно на 3–4 года. В принципе отставание было как по времени начала эксплуатации блоков на тиристорах, так и в широте номенклатуры, а главное — в параметрах и в качестве тиристорных. Прежде всего, у отечественных тиристорных средней мощности был значительно больший (в 3–5 раз) ток управления, большее падение напряжения на открытом тиристоре и более низкое быстродействие. Некоторым утешением для нас служит относительно ранние разработки мощных тиристорных на токи 50–200 А для электротехнической промышленности с 1965 года, которые разрабатывались и производились в ВЭИ им. Ленина, в МНИЭИ, на заводах в Саранске, Таллине и др. Причем в 1971 году мощные высокочастотные тиристоры типа ТЧ на токи 50–150 А со временем обратного восстановления  $\approx 25$  мкс успешно конкурировали с зарубежными тиристорами и поставлялись на экспорт.

Как уже указывали авторы в статье [15], отставание в элементной базе иногда оказы-

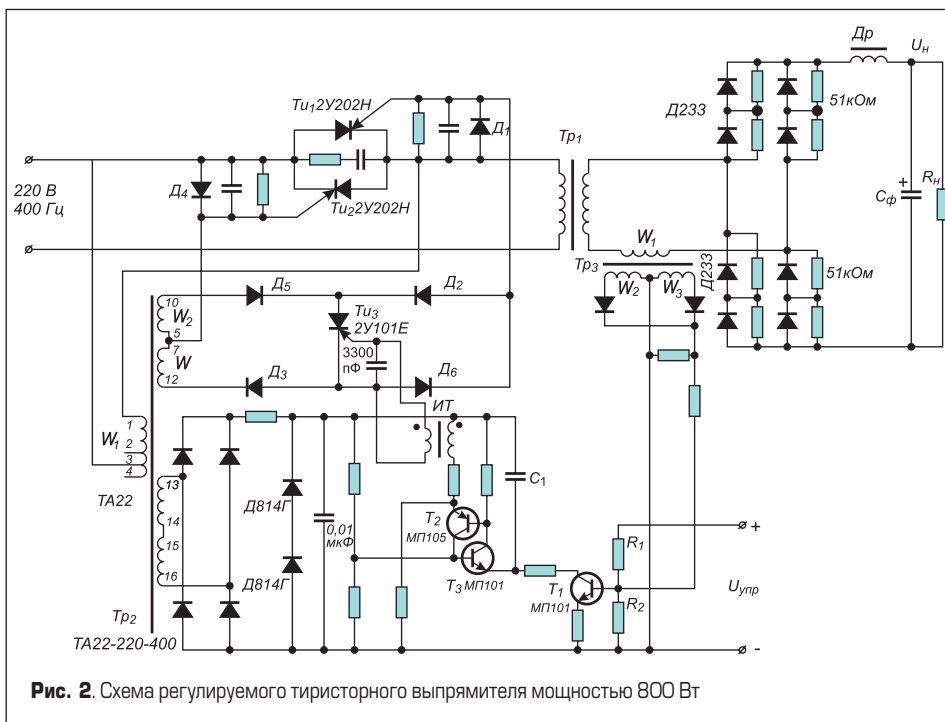


Рис. 2. Схема регулируемого тиристорного выпрямителя мощностью 800 Вт

валось полезным. Речь идет о «закрытии» тупикового направления в тиристорной технологии, в части разработки запираемых тиристоров на токи до 20 А, поскольку это направление оказалось бесперспективным ввиду быстрого развития транзисторов с аналогичными параметрами по напряжению и току (в США остановились в этом направлении на запираемом тиристоре с током 7 А). Ниша запираемых тиристоров за рубежом и в нашей стране осталась только в диапазоне сверхмощных токов сотни – тысячи ампер, на напряжении до нескольких киловольт.

Для иллюстрации приведем пример типовых применений тиристоров. В 1969 году одним из авторов вместе с А. И. Гинзбургом был разработан регулируемый тиристорный выпрямитель, входящий в систему стабилизации тока импульсного генератора СВЧ [16]. Схема регулируемого тиристорного выпрямителя представлена на рис. 2.

Этот блок питания обеспечивал выходную мощность 800 Вт при  $U_n = 200 \text{ В} / 4 \text{ А}$ . Его силовая часть построена следующим образом. Входное питающее напряжение 220 В, 400 Гц поступает через два силовых тиристора  $Tu_1, Tu_2$ , включенные встречно-параллельно, на обмотку силового трансформатора  $Tr_1$ . Напряжение от его вторичной обмотки в виде фрагментов синусоиды после угла регулирования (момент времени включения тиристоров) поступает на мостовой выпрямитель на диодах типа Д233, нагруженный на сглаживающий фильтр (Др–Сф). Основная обратная связь, задающая уровень стабилизируемого напряжения  $U_n$  (пределы изменения от 7 до 280 В) и обозначенная как  $U_{упр}$ , представляет собой постоянное напряжение, пропорциональное импульсному току СВЧ-генератора, которое поступает от внешнего блока (модулятора передатчика). Напряжение  $U_{упр}$  через омический делитель  $R_1, R_2$  поступает на базу транзистора  $T_1$ , включенного по схеме с глубокой отрицательной обратной связью по току эмиттера, благодаря чему конденсатор  $C_1$  заряжается током практически

прямоугольной формы. При этом достигается лучшая линейность характеристики управления выпрямителя. Фазосдвигающее устройство (ФСУ) питается от выпрямленного напряжения трапецеидальной формы, которое формируется от вторичных обмоток малоомощного вспомогательного трансформатора  $Tr_2$  типа ТА22, первичная обмотка  $w_1$  которого подключена к анод-катодным выводам силовых тиристоров. Тиристорные ключи управляются по схеме оптимального управления, причем импульсы, поступающий на управляющий переход силового тиристора, коммутируется малоомощным тиристором  $Ti_3$  типа 2У101Е, включенным в диагональ мостового диодного ключа переменного тока. В свою очередь, импульс для отпираания малоомощного тиристора поступает с вторичной обмотки импульсного трансформатора ИТ. Его первичная обмотка подключена к выходу ФСУ, которое выполнено на транзисторном аналоге однопереходного транзистора, так называемой  $p-n-p-n$ -структуре. Схема ФСУ построена на транзисторах  $T_1-T_3$ . В рассматриваемом регулируемом выпрямителе имеется специальная схема, содержащая трансформатор тока  $Tr_3$ , выполняющая очень важную функцию. Поясним назначение этого узла, предназначенного для устранения опасного подмагничивания сердечника силового трансформатора, подробнее.

Впервые вариант устранения несимметричного режима перемагничивания в трансформаторе, который подключен к сети через ключевые полупроводниковые приборы, был описан в патенте США «Использование симметричных устройств в силовых цепях переменного тока с регулируемой фазой», его автор — Н. F. Storm [17]. Однако возникновение несимметричного режима работы силового трансформатора в патенте объяснялось несимметричным характером нагрузки ключевого регулятора, но это частный случай таких режимов, которые могут приводить к насыщению сердечника. Одному из авторов вместе с А. И. Гинзбургом удалось подробно описать режим подмагничивания

в сердечнике трансформатора в схеме тиристорного регулятора, когда вторичная обмотка силового трансформатора нагружена на выпрямитель с индуктивной реакцией фильтра [18]. В этой статье было показано, что из-за процесса «накопления» возникает приращение индукции в сердечнике, которое неминуемо приводит к насыщению сердечника трансформатора, а следовательно, к сверхтокам через первичную обмотку, то есть к аварийным режимам через силовые ключи. Удержание «намагниченности» происходит благодаря контуру тока подмагничивания, который обеспечивается индуктивностью рассеяния трансформатора  $L_s$  и активным сопротивлением вторичной обмотки трансформатора  $R_{w2}$ . Этот ток протекает от вторичной обмотки через замкнутые диоды выпрямительного моста. В рассматриваемой схеме регулируемого выпрямителя формирование угла отпираания тиристоров происходит путем модулирования переднего фронта импульса. После запираания тиристора, то есть при изменении знака сетевого напряжения, энергия магнитного потока намагничивания превращается в импульс тока во вторичной цепи трансформатора в начале следующего полупериода сети. Этот процесс «удерживания» на петле перемагничивания сердечника намагниченного состояния происходит с помощью тока, протекающего по контуру: вторичная обмотка трансформатора – открытые («нулевые») диоды выпрямителя. Таким образом, критерий необратимого нарастания подмагничивания определяется временем спада тока во вторичной обмотке трансформатора в интервале запертого состояния тиристоров. Исходя из эквивалентной схемы этого контура время спада тока до нуля определяется постоянной времени  $\tau_{сн} = L_s / R_{w2}$ . Можно утверждать, что процесс опасного намагничивания в трансформаторах, работающих в схемах регулируемых выпрямителей с ключами на стороне сети при частотах 50, 60 Гц, практически исключен, во всяком случае, для мощностей этих устройств 200–400 Вт. Действительно, при угле отпираания, минимальное значение которого обычно равно 15 эл. град., время закрытого состояния тиристоров равно  $t_{мин} \approx 0,83 \text{ мс}$  при частоте 50 Гц. Поэтому при постоянной времени  $\tau_{сн}$ , которая, как правило, равна для регуляторов подобной мощности 0,1–0,5 мс, ток подмагничивания успеет снизиться до нуля. Однако совсем другая ситуация складывается при работе тиристорного регулятора на частоте сети 400–1000 Гц, где  $t_{мин} \approx (104,0-42,0) \text{ мкс}$ . При таких значениях времени закрытого состояния тиристоров практически неизбежно насыщение сердечника трансформатора в процессе работы тиристорного регулятора.

Наконец, можно описать работу схемы устранения подмагничивания трансформатора в рассматриваемом тиристорном регуляторе. Для выявления сигнала о несимметричном перемагничивании сердечника силового трансформатора в цепи его вторичной обмотки установлен трансформатор тока  $Tr_3$ , который повторяет форму тока, протекающего в контуре между обмоткой  $W_2$  трансформатора  $Tr_1$  и выходным силовым выпрямителем. Вторичные обмотки трансформатора  $Tr_3$  через вы-

прямитель нагружены на резистор, напряжение с которого через развязывающий резистор подается на вход делителя напряжения на резисторах R1, R2, подключенного к сигналу обратной связи *U<sub>упр</sub>*. Как показано на схеме, этот корректирующий сигнал суммируется с током от сигнала *U<sub>упр</sub>* на резисторе R1 таким образом, чтобы устранять несимметричный режим перемагничивания трансформатора Tr<sub>1</sub>. Следует подчеркнуть, что коррекция угла ( $\alpha$ ) отпирания тиристоров происходит только в интервале времени, когда тиристоры выключены. Это объясняется тем, что питание узла оптимального управления тиристором и схемы ФСУ появляется только на этапе формирования угла регулирования  $\alpha$ . Так как, когда тиристоры открыты, первичная обмотка трансформатора питания схемы управления Tr<sub>2</sub> закорочена напряжением насыщения анод-катод силовых тиристоров.

Отметим еще одну особенность рассмотренной схемы. В цепи формирования импульса управления тиристорами включен маломощный тиристор Ти<sub>3</sub>, который рассчитан на допустимое напряжение 150 В. В связи с этим последовательно с напряжением анод-катод тиристоров, которое по форме повторяет сетевое питающее напряжение, встречно включены обмотки (W<sub>2</sub>, W<sub>3</sub>) трансформатора Tr<sub>2</sub>. Таким образом, обеспечивается приемлемый уровень рабочего напряжения тиристора 2У101Е.

Упомянутое обстоятельство еще раз подтверждает определенный «голод» отечественных разработчиков в части номенклатуры полупроводниковых компонентов. Надо признать, что американские ученые и специалисты при разработке большого количества четырехслойных полупроводниковых приборов различного назначения одновременно создавали специальные компоненты для облегчения управления мощными тиристорами и симисторами, иногда называемыми триаками. Например, в рассмотренной схеме можно было использовать вместо тиристора 2У101Е специально разработанный для ВМФ США тиристор C5D (2N2329) на 400 В, 1,6 А для работы на частотах от 50 до 400 Гц. При этом его корпус ТО-5 практически не отличается от корпуса нашего маломощного тиристора 2У101. Другой прибор, который был также одновременно разработан с силовыми тиристорами, — это двухбазовый диод [11], потом переименованный в однопереходный транзистор [19]. Например, однопереходный транзистор типа 2N2647, который выпускался в США, мы вынуждены были заменять его двухтранзисторным аналогом. В схеме ФСУ эта структура образована транзисторами Т2, Т3. Читатель может сам определить, насколько упростилась бы схема управления, если в СССР были аналогичные приборы. Самое печальное, что отечественный однопереходный транзистор с приемкой заказчика появился у нас только в 1979–1981 гг., когда уже широко применялись транзисторные преобразователи и инверторы. Транзисторные регулируемые преобразователи, работающие на частотах 20–100 кГц, питались непосредственно от сетевых нерегулируемых выпрямителей. Эти устройства в диапазоне мощностей до 2 кВт

полностью вытеснили тиристорные регуляторы даже в сетях переменного тока 400–1000 Гц.

В качестве примера использования мощных тиристоров приведем схему силового инвертора с выходной мощностью 4000 Вт, который питался от бортовой сети напряжением 27 В. Речь идет о специальном блоке, который был разработан одним из авторов совместно с группой специалистов, руководимой А. И. Гинзбургом [20]. В этой статье рассматривается один из вариантов системы для заряда емкостного накопителя с регулируемым уровнем энергии, питающейся от аккумуляторной батареи (АБ). В качестве преобразующего устройства в нем использован широтно-регулируемый тиристорный инвертор с трансформаторным выходом, так как выходное напряжение много выше первичного напряжения АБ. Применение регулируемого инвертора объяснялось тремя причинами:

- возможностью изменения величины энергии в накопительном конденсаторе;
- возможностью внешнего задания частоты разряда накопленной энергии в пределах от 20 до 100 Гц;
- осуществлением оптимального закона зарядки накопительного конденсатора по критерию — минимум массы и максимум КПД всего устройства в целом (включая и АБ).

Упрощенная схема тиристорного инвертора приведена на рис. 3.

Так как нас интересует именно опыт применения мощных тиристоров, то в данной статье будем рассматривать построение силовой части

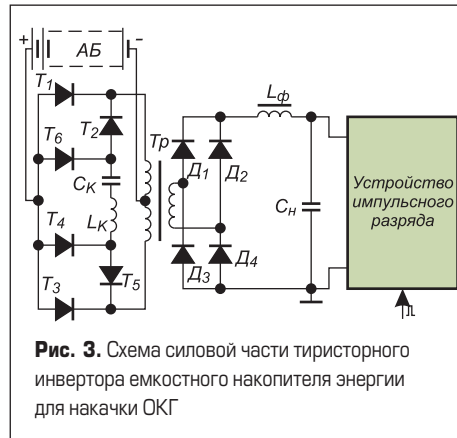


Рис. 3. Схема силовой части тиристорного инвертора емкостного накопителя энергии для накачки ОКГ

устройства для накопления энергии. Отметим при этом, что после завершения зарядки конденсатора он разряжался на специальную кварцевую лампу, световая энергия которой передавалась для «накачки» оптического квантового генератора (ОКГ). Силовая часть построена на основе известной схемы регулируемого инвертора [21] с импульсной коммутацией силовых тиристоров, но только в данной схеме отсутствуют обратные вентили. Схема инвертора построена следующим образом. Входное напряжение от отрицательного полюса АБ поступает на среднюю точку первичной обмотки силового трансформатора Tr, а положительный полюс АБ через поочередно открывающиеся силовые основные тиристоры Т1, Т3 подключается к крайним выводам обмотки Tr. Для выключения тиристоров Т1, Т3, после окончания заданной длительности импульса, изменяющегося по закону ШИМ, служит индуктивно-емкост-

ной коммутирующий контур Ск–Lк, обеспечивающий мощный запирающий импульс. Этот контур подключает обратное напряжение к тиристорам Т1, Т3 через дополнительные тиристоры Т2, Т4 (или Т5, Т6) соответственно. Широтно-модулированные импульсы высокого напряжения вторичной обмотки Tr через выпрямительный мост (Д1–Д4) поступают на фильтр Lф–Сн. Накопление энергии, то есть постепенный заряд конденсатора Сн, происходит в течение определенного числа периодов частоты работы инвертора (1000 Гц). Общее время цикла заряда определяется частотой разряда на осветительную лампу, например, при максимальной частоте разряда 100 Гц количество полупериодов (1000 Гц) будет 20. Оптимальный закон изменения длительности импульсов, формируемых силовыми тиристорами, задается специальным устройством (задатчиком), который запускается в момент нового цикла зарядки накопительного конденсатора Сн.

Приведем некоторые технические характеристики этого инвертора. При частоте разряда Сн, равной 100 Гц, при максимальном напряжении 900 В средняя мощность за цикл зарядки  $\approx 4500$  Вт. В этой мощности учтены средневзвешенный КПД, равный 0,72, а также начальное (остаточное) напряжение на конденсаторе  $\approx 100$  В. Энергия накопления равна 40 Дж, емкость конденсатора Сн — 100 мкФ. Средний ток потребления от АБ — около 200 А. В инверторе использованы тиристоры типа ТЧ–150 на 200 В. Параметры запирающего коммутирующего контура: Lк = 2 мкГн, Ск = 40,0 мкФ — набор из конденсаторов типа МБГЧ на 250 В. Дроссель фильтра Lф = 8 мГн.

### Заключение

1. При зарождении импульсных ИВЭ в 1940–1950 гг. сложно было даже представить, что через 40–50 лет импульсные ИВЭ будут так широко распространены и будут обладать очень высокими характеристиками, близкими к предельно возможным. В этой связи интересно рассмотреть хронологию их развития:

- **Середина 1950-х гг.** Это время характерно заменой в РЭА электронных ламп на полупроводниковые транзисторы и диоды, что повлекло за собой качественное изменение номенклатуры источников питания. В частности, потребовалась разработка источников питания с низким выходным напряжением (до 12–60 В), но на большие токи (единицы – десятки ампер). Эта задача решалась при использовании трансформаторных источников питания, во вторичных цепях которых использовались импульсные стабилизаторы напряжения (КСН). В них в качестве силовых ключей применялись в основном мощные германиевые сплавные PNP-транзисторы, которые по параметрам были низкочастотными и низковольтными ( $U_{CE0} = -45...-60$  В). В связи с этим частота коммутации силового транзистора составляла 3–5 кГц.
- **В период 1959–1965 гг.** в мощных (150–400 Вт и более) ИВЭ стали широко использовать-

ся КСН и регуляторы в сетях переменного тока, выполненные на магнитных ключевых элементах, которые могли коммутировать напряжения в десятки – сотни вольт и токи в единицы – десятки ампер. Эти блоки питания бортового применения имели удельные массо-габаритные характеристики  $P_v$  порядка 25–40 Вт/дм<sup>3</sup>.

- **Начиная с 1956 года** энергично развивалось новое направление в силовой электронике, основанное на использовании четырехслойных полупроводниковых ключевых приборов различного назначения. На Западе тиристоры широко применялись уже в 1959–1962 гг. В СССР первые публикации появились в 1962 году, но только в 1966–1970 гг. это направление техники нашло широкое применение. Именно с этого времени развитие в Советском Союзе полупроводниковой техники и электроники начинает заметно отставать (на 4–5 лет и более).
- 2. Основные тенденции развития импульсных источников питания с момента их зарождения и до 1970-х гг.:
  - повышение экономичности (повышение КПД);
  - улучшение массо-габаритных показателей (повышение удельной мощности);
  - повышение надежности работы.
- 3. **Важно отметить**, что развитие импульсных ИВЭ и средств вторичного электропитания в целом определялось, во-первых, развитием и совершенствованием электронных компонентов и магнитных материалов. Во-вторых, оно было связано с совершенствованием силовых структур стабилизаторов и преобразователей (инверторов) напряжения.

### Литература

1. Линенберг Г. Г. Вибропреобразователи. М.-Л.: 1955.
2. Вибропреобразователь / Энциклопедия современной техники. Под ред. А. И. Берга и В. А. Трапезникова. М.: Госиздат «Советская энциклопедия: энциклопедии, словари, справочники», 1963.
3. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1973.
4. Справочник по полупроводниковым диодам и транзисторам / Под ред. М. Горюнова. М.-Л.: Энергия, 1964.
5. Шилинг В. Схемы выпрямителей, инверторов и преобразователей частоты / Пер. с нем. М.-Л.: 1950.
6. Сторм Г. Ф. Магнитные усилители. М.: Изд. иностранной литературы, 1956.
7. Стефанович Т. Х. Расчет магнитных усилителей и магнитных реле при помощи универсальной характеристики // ВЭП. 1956. № 6.
8. Магнитные усилители серии ТУМ (50 Гц). Тороидальные магнитные усилители серии ТУМ-АК (400 Гц). Калинин: Дом научно-технической информации и пропаганды, 1963.
9. 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).
10. Молл, Таненбаум, Голдей, Голоньяк Н. Полупроводниковые переключающие приборы типа (p-n-p-n), Proc. IRE, vol. 44, Sept. 1956 / Рус. пер. в сб. «Полупроводниковые управляемые вентили» / Под ред. Комара В. Г., Лабунцова В. А. М.: Госэнергоиздат, 1962.
11. Джентри Ф., Гутцвиллер Ф., Голоньяк Н., фон Застров Э. Управляемые полупроводниковые вентили / Пер. с англ. / Под ред. Тучкевича В. М. М.: Мир, 1967.
12. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением / Сб. переводных статей. / Под ред. Горяинова А. М.-Л.: 1962.
13. Полупроводниковые управляемые вентили — тиристоры / Сб. ст. под ред. М. Г. Чиликина. М.-Л.: 1964.
14. Тиристоры / Технический справочник. Пер. с англ. / Под ред. Лабунцова В. А., Обухова С. Г., Свиридова А. Ф. М.: Энергия, 1971.
15. Эраносян С. А., Ланцов В. В. Интеллектуальные силовые модули для источников электропитания — один из путей возрождения отечественной микроэлектроники XXI века // Электрическое питание. 2005. № 1.
16. Гинзбург А. И., Эраносян С. А. Опыт разработки системы стабилизации тока импульсного генератора СВЧ / Сб. «Вопросы специальной радиоэлектроники». Серия общетехническая XII. 1970. № 21.
17. Patent USA № 3348128. Oct. 17, 1964. Cl 323-4.
18. Гинзбург А. И., Эраносян С. А. Подмагничивание трансформатора в тиристорном выпрямителе с индуктивным фильтром // Морское приборостроение. Серия VII Общетехническая, вып. 9. 1971.
19. Marston R. M. 20 Unijunction Transistor Applications // Radio – Electronics, № T-6, № T-7. 1968.
20. Гинзбург А. И., Егоров В. А., Журавлев Б. Н., Эраносян С. А. Анализ процессов в емкостном накопителе с широтно-регулируемым инвертором / Сб. «Полупроводниковые приборы в технике электросвязи». Вып. 12. М.: Связь, 1973.
21. Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов / Пер. с англ. / Под ред. Антика И. В. М.: Энергия, 1969.

*Продолжение следует*