

Обратимые трансформаторные импульсные конверторы

для резервно-аккумуляторных источников бесперебойного питания

Работу можно рассматривать как модернизацию схемотехнических решений для обратимых трансформаторных и трансреакторных импульсных конверторов (ОТИК) в составе резервно-аккумуляторных источников бесперебойного питания (ИБП) с дифференциальным звеном постоянного повышенного напряжения (ДЗППН), опубликованных в журнале «Силовая электроника» (2016, № 2) [1]. Предлагаемые схемы ОТИК обеспечивают повышение КПД, надежности, удельной мощности, а также снижение помехоизлучений. Эти решения, защищенные приоритетом РФ, представляют интерес для широкого круга специалистов в области импульсной силовой электроники, в частности — авиационно-космических и других транспортных электротехнических комплексов.

**Станислав Резников, д. т. н.
Игорь Харченко, к. т. н.
Михаил Марченко, к. т. н.
Николай Жегов
Валерий Савостьянов**

В настоящее время наблюдается бурное развитие электрификации транспортных средств, мобильных средств связи, космических спутников и летательных аппаратов с использованием низковольтных химических генераторов, солнечных батарей, аккумуляторных и суперконденсаторных (ионисторных) батарей. Основным недостатком указанных первичных источников электропитания — их относительно низкое напряжение, а следовательно, большой потребляемый ток, существенно снижающий КПД вторичных источников электропитания (ВИЭП), в частности так называемых резервно-аккумуляторных источников бесперебойного питания (РА ИБП).

Основным типом ВИЭП и РА ИБП является импульсный конвертор (ИК) на базе низковольтных (сильноточных) полевых транзисторных ключей (типа MOSFET) с относительно малым сопротивлением канала. Поскольку требуется широкий диапазон уровней выходных напряжений ИК и желательно совмещать функции прямого (повышающего) и обратного (понижающего) преобразований, а также противоречивы требования к ключевым транзисторам по уровням токов и напряжений, то становится очевидной потребность в разработке высокоэффективных по КПД, удельной мощности и надежности обратимых импульсных преобразователей (ОИК) с согласующей электромагнитной гальванической развязкой: трансформаторной или трансреакторной, т. е. так называемых обратимых транс-

форматорных (трансреакторных) импульсных конверторов (ОТИК).

Следует отметить, что использование ОТИК на базе двухтактных высокочастотных инверторов прямоугольного напряжения (типа «меандр») с выходным выпрямителем, а если учесть обратимость преобразования — ОТИК в виде двух двунаправленных инверторно-выпрямительных преобразователей (ДИВП) с промежуточным трансформаторным звеном высокой частоты (ТЗВЧ) на базе трансформатора прямоугольного напряжения существенно затруднено при больших мощностях (от одного киловатта и более). Для реализации этого решения необходимы специальные антинасыщающие устройства симметрирования вольт-секундных параметров (интегралов) разнополярных импульсов питающего напряжения трансформатора (например, введение высокочастотного разделительного конденсатора с относительно низкой надежностью и большими массой и габаритами или с быстродействующей микропроцессорной системой автоматической отрицательной обратной связи с низкой надежностью и помехоустойчивостью).

Поэтому представляется целесообразным рассмотреть два взаимноальтернативных конкурентоспособных варианта структур ОТИК в качестве ВИЭП для РА ИБП (рис. 1):

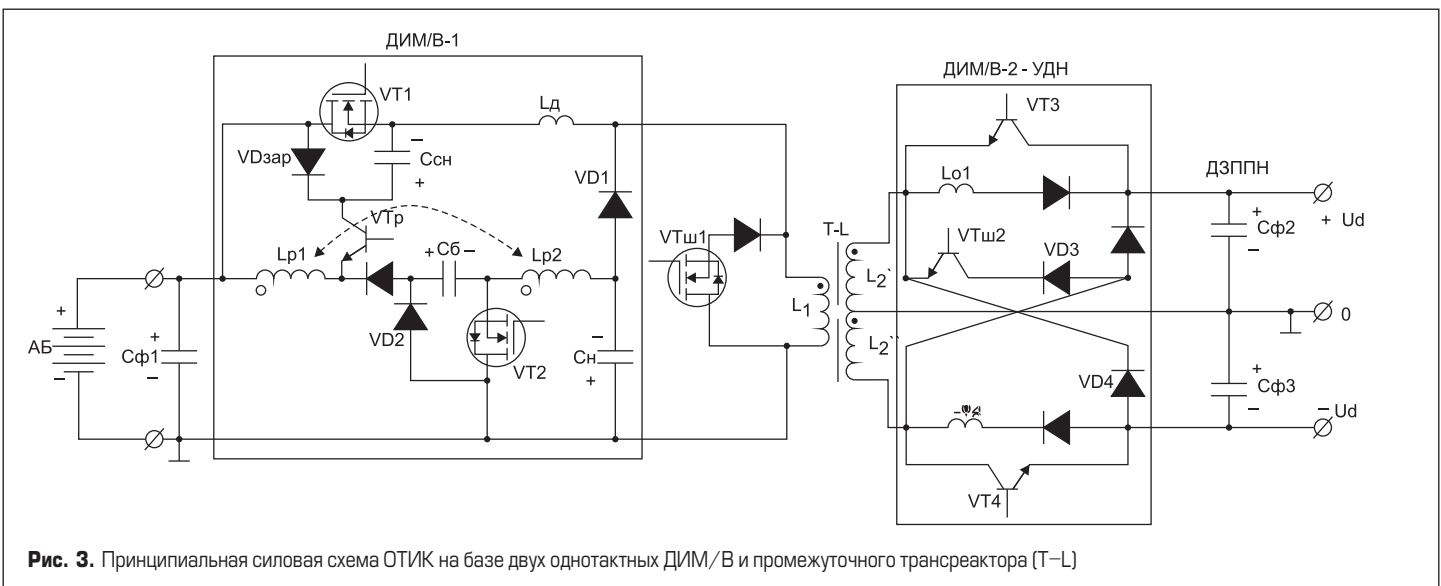
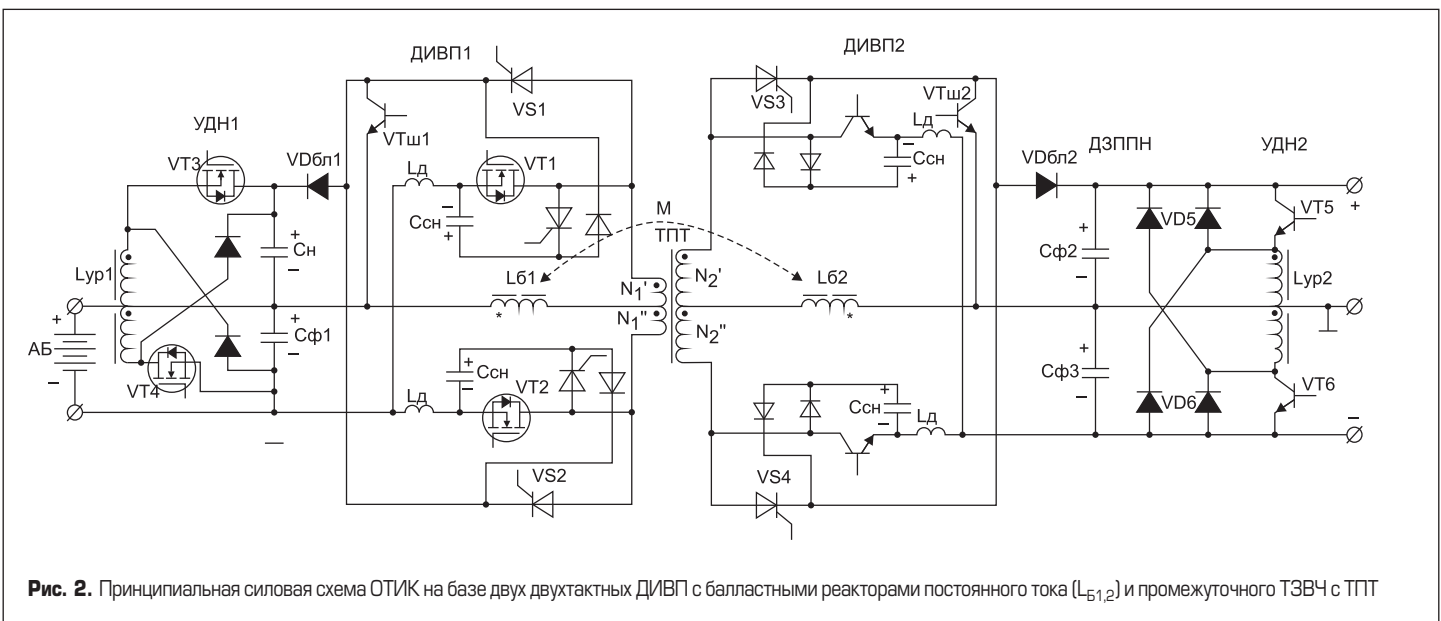
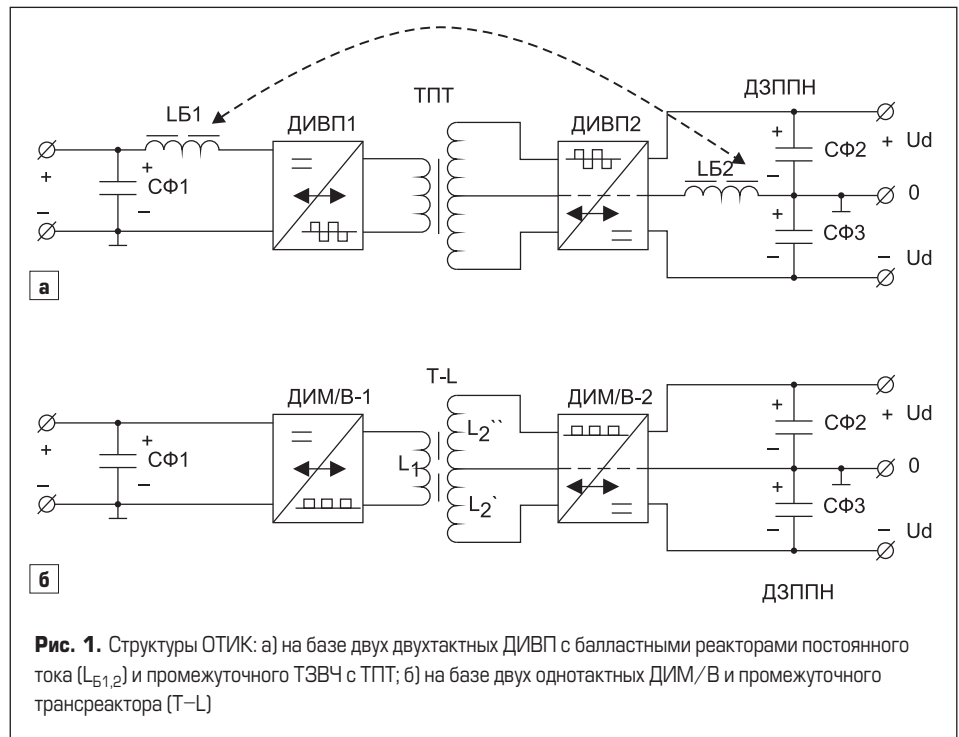
- ОТИК на базе двухтактных ДИВП с балластными реакторами постоянного тока и промежуточного ТЗВЧ с трансформатором прямоугольного тока (ТПТ);

- ОТИК на базе двух одноконтных двунаправленных импульсных модуляторов/выпрямителей (ДИМ/В) и промежуточного трансформатора (Т-Л).

Оба варианта обеспечивают согласование входного и выходного преобразователей по напряжению и их гальваническую развязку, а также исключают насыщение магнитопровода трансформатора прямоугольного тока (ТПТ) и трансреактора без введения специальных симметрирующих устройств.

Ранее при участии авторов данной статьи было предложено несколько схемотехнических решений для реализации структур, показанных на рис. 1 [1, 2]. Данную статью можно рассматривать как модернизацию этих решений для ОТИК с целью повышения КПД и удельной мощности, а также снижения помехоизлучений. Данные решения защищены приоритетом РФ. На рис. 2 и 3 приведены две принципиальные силовые схемы ОТИК в соответствии с двумя структурами, представленными на рис. 1.

Показанные на рис. 2 ДИВП₁ и ДИВП₂ выполнены на базе одной и той же схемы, но с использованием различных транзистор-



ных ключей — полевых и биполярных соответственно. Они дополнены однотипными (по схеме) уравнительными делителями напряжений (УДН_{1,2}), выравнивающими напряжения на двух конденсаторных фильтровых стойках: $C_{\Phi 1}-C_{\Phi 2}$ и $C_{\Phi 2}-C_{\Phi 3}$, где $C_{\Phi 1}$ — накопительный (буферный) конденсатор для утилизации энергии и индуктивности рассеяния секций первичной обмотки (N_1-N_2) ТПТ. Следует отметить, что в ДИВП₂ роль $C_{\Phi 1}$ выполняет один из фильтровых конденсаторов ($C_{\Phi 2}$).

Схема ДИВП отличается от известной схемы инвертора прямоугольного напряжения с двухсекционной первичной обмоткой трансформатора следующим:

- наличием реактивного звена постоянно-го тока, превращающего его в «источник тока» (вместо «источника напряжения»), требующий в качестве нагрузки включить либо конденсатор, либо резистор (или их комбинацию), а также пригодный для параллельно-модульного расщепления;
- наличием вентильных цепей ($VS_{1,2}-VD_{БЛ1}$ и $VS_{3,4}-VD_{БЛ2}$) для рекуперации энергии индуктивностей рассеяния секций обмоток трансформатора, исключающих коммутационные перенапряжения на транзисторных ключах ($VT_{1,2}$);
- введением цепей закорачивания токов реакторов и трансформаторных обмоток с помощью шунтирующих ключей ($VT_{Ш1,2}$) на промежуточных интервалах токозамыкающих пауз между интервалами нарастания и спада потокосцеплений в каждом периоде высокочастотной широтно-импульсной модуляции ($T_{ШМ}$), позволяющих повысить КПД трансформации тока и устойчивость процессов регулирования (стабилизации) выходных параметров и величины максимальных потокосцеплений путем дуального управления по двум взаимонезависимым параметрам: $\gamma_{нар}$ и $\gamma_{п}$ — относительным длительностям импульсов нарастания токов и токозамыкающих пауз соответственно;
- использованием взаимоиндуктивной связи (М) между балластными реакторами ($L_{Б1}$ и $L_{Б2}$), позволяющей существенно повысить удельную мощность и КПД за счет прямо- и обратного трансформации тока (минуя ТПТ);
- обеспечением мягкой коммутации транзисторных ключей в результате введения нерассеивающих (тепло) демпферно-снабберных цепей ($L_{д}-C_{СН}$) с разрядкой снабберных конденсаторов на индуктивные ветви и дальнейшей утилизацией их энергии, что позволяет существенно повысить КПД и снизить помехоизлучения.

Уравнительные делители напряжений (УДН₁ и УДН₂) представляют собой двунаправленные «транспортёры заряда» на базе полярно-инвертирующего обратимого конвертора в виде четырехплечевого диодно-ключевого косоугольного моста, зашунтированного по одной диагонали уравнительным двухсекционным реактором ($L_{ур}$), а по другой — двухконденсаторной стойкой ($C_{\Phi 1}-C_{\Phi 2}$ и $C_{\Phi 2}-C_{\Phi 3}$). При высокочастотной модуляции одного из ключей происходит как прямоходовая, так

и обратногоходовая трансформация тока, что обеспечивает взаимовыравнивание напряжений на конденсаторах стойки. Достоинством схемы, помимо ее простоты, является исключение цепей для «сквозных сверхтоков» при несанкционированном включении обоих ключей (например, из-за воздействия на блок управления мощного электромагнитного импульса молнии).

Вторая схема ОТИК (рис. 3), так же как и первая, содержит в низковольтном (силноточном) контуре только один ключ в цепи нарастания тока, что также обеспечивает ей в совокупности с мягкой коммутацией высокий КПД. В ней тоже имеются две двухконденсаторные стойки ($C_{\Phi 1}-C_{\Phi 2}$ и $C_{\Phi 1}-C_{\Phi 2}$). Однако вместо двухтактного трансформатора прямоугольного тока согласование напряжений и гальваническая развязка обеспечиваются двухобмоточным реактором (трансреактором Т-Л). При этом в ДИМ/В-1 рекуперация энергии рассеяния первичной обмотки (L_1) трансреактора осуществляется сначала в накопительный конденсатор ($C_{\Phi 1}$), а уже из него — в фильтровый конденсатор ($C_{\Phi 2}$) через полярно-инвертирующий одноконтурный импульсный конвертор с промежуточным буферным конденсатором (C_{Φ}) по модернизированной «топологии Кука».

Модернизация заключается в применении дополнительного рекуперативного трансреактора ($L_{р1}-L_{р2}$) с прямо- и обратногоходовой трансформацией тока, что повышает эффективность узла рекуперации (КПД и удельную мощность). Здесь, как и в первой схеме, обеспечивается мягкая коммутация низковольтного силового ключа (VT_1) с помощью нерассеивающей демпферно-снабберной цепочки ($L_{д}-C_{СН}$) и диодно-ключевой зарядно-разрядной стойки ($VD_{зар}-VT_{р}$). Во втором ДИМ/В (ДИМ/В-2-УДН) совмещены функции модулятора, выпрямителя и уравнительного делителя напряжений ДЗППН. Как и в первой схеме, здесь используется двустороннее шунтирование обмоток трансреактора (ключами $VT_{Ш1,2}$) в токозамыкающих паузах для повышения КПД трансформации тока и повышения устойчивости замкнутой системы регулирования (стабилизации).

Следует также отметить еще одно общее достоинство обеих предложенных схем: отсутствие реверса в полном потокосцеплении балластных реакторов ($L_{Б1,2}$) и трансреактора (Т-Л) при переключениях направлений преобразования электроэнергии (от АБ к ДЗППН и обратно), что существенно повышает быстродействие переключений и, следовательно, качество переходных процессов в замкнутой системе регулирования и стабилизации.

Экспериментальные исследования лабораторных макетов и компьютерно-имитационное моделирование предложенных схемотехнических решений для ОТИК подтвердили их работоспособность, а также высокие (приблизительно соизмеримые) массо-энергетические характеристики и низкие уровни помехоизлучений.

Несомненное преимущество схемы с трансформаторным звеном высокой частоты (ТЗВЧ) — возможность его использования для формирования выходного синусоидального напряжения с регулируемой частотой с помощью дополнительной одной обмотки или трех обмоток с выходным циклоконвертором (циклически — реверсируемым выпрямителем), в том числе трехфазным.

При выборе варианта следует учитывать конкретные заданные технические требования. Обе схемы пригодны для расщепленно-модульного использования, обеспечивающего модульно-масштабируемую архитектуру транспортных резервно-аккумуляторных ИБП с высокими показателями производственной, монтажной и ремонтно-эксплуатационной технологичности. Они предусматривают использование отечественной номенклатуры изделий силовой электроники, в частности авиакосмической.

Заключение

Рассмотренные в статье схемотехнические решения для обратимых трансформаторного и трансреакторного импульсных конверторов (ОТИК) с униполярными и дифференциальными внешними выводами созданы в результате модернизации предложенных ранее с участием авторов схем, приведенных в работе [1]. Указанные решения позволяют существенно улучшить массо-энергетические характеристики (КПД и удельную мощность), а также повысить надежность и снизить помехоизлучения. Оба решения, защищенные приоритетом РФ, пригодны для расщепленно-модульного исполнения, обеспечивающего модульно-масштабируемую архитектуру транспортных и спутниковых резервно-аккумуляторных источников бесперебойного питания с высокими показателями производственной, монтажной и ремонтно-эксплуатационной технологичности. Они предусматривают использование изделий отечественной силовой электроники, в частности авиакосмической.

Полагаем, что эта статья будет интересна широкому кругу специалистов в области импульсной силовой электроники, предназначенной, в частности, для авиационно-космических и других транспортных электротехнических комплексов.

Литература

1. Резников С., Климова С., Харченко И., Смирнов В., Савостьянов В. Резервно-аккумуляторные источники бесперебойного питания для автономных и сетевых систем электроснабжения со звеном постоянного повышенного напряжения // Силовая электроника. 2016. № 2.
2. Резников С. Б., Бочаров В. В., Харченко И. А. Электромагнитная и электроэнергетическая совместимость систем электроснабжения и вторичных источников питания полностью электрифицированных самолетов / Под ред. С. Б. Резникова. М.: Изд-во МАИ, 2014.