

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.314.58

ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ БОРТОВЫХ АВИАКОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Резников С.Б.^{1*}, Харченко И.А.^{2**}, Марченко М.В.^{3***}, Жегов Н.А.^{3****}

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

² Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск
Министерства обороны Российской Федерации,
«ЦНИИИ ИВ» МО РФ, Нахабино-2, Московская обл., 143432, Россия

³ Московское опытно-конструкторское бюро «МАРС»,
1-й Щемилковский пер., 16, Москва, 127473, Россия

* e-mail: rezn41@mail.ru

** e-mail: ihar@mail333.com

*** e-mail: mfallout@yandex.ru

**** e-mail: nzhegov@yandex.ru

Рассматриваются нетрадиционные схемотехнические решения для трансформаторных многофункциональных импульсных преобразователей, предназначенных для источников бесперебойного питания в составе бортовых авиакосмических электроэнергетических комплексов (ЭЭК) и систем электроснабжения (СЭС). Решения защищены приоритетом РФ.

Ключевые слова: силовая электроника, импульсные преобразователи, источники бесперебойного питания, трансформаторные конвертеры и инверторы, авиационно-космические вторичные источники электропитания, электроприводы летательных аппаратов.

Введение

Для питания исполнительных бесконтактных электродвигателей (в частности, авиационно-бортового оборудования) в силу необходимости пространственного формирования в них переменного магнитного поля (кругового или линейного) за счёт токов в гибких проводах требуется напряжение более высокое, чем обеспечиваемое элементами аккумуляторных, солнечных или суперконденсаторных (ионисторных) батарей. Обеспечение отно-

сительно повышенного напряжения только за счёт последовательного («этажерочного») соединения низковольтных элементов или самих указанных батарей при существенных токах питания технологически затруднено и приводит к снижению массогабаритных, надёжностных и стоимостных показателей. Так, например, на случай перегорания выводов (или обрыва) звеньев «этажерки» они должны шунтироваться диодами с низким напряжением проводящих переходов, а на случай пробоев на

выводах какого-либо из параллельных звеньев — снабжаться размыкающими предохранителями. Поэтому для повышения напряжения первичного источника электропитания с относительно низким напряжением используются импульсные конверторы (ИК, или иначе DC/DC-преобразователи) на базе полевых транзисторных ключей (MOSFET) с малым сопротивлением канала. При этом они должны быть обратимыми (ОИК) для обеспечения также интенсивной зарядки питающих батарей. Подобные преобразователи, как правило, входят в состав так называемых вторичных источников электропитания (ВИЭП) или резервно-аккумуляторных источников бесперебойного питания (ИБП) [1].

Авиакосмические ИБП, входящие в состав бортовых электроэнергетических комплексов и систем электроснабжения, получают первичное питание от химических или солнечных аккумуляторных или разработанных к настоящему времени суперконденсаторных (ионисторных) батарей с относительно низким напряжением (28 В). При этом выходными напряжениями ИБП, как правило, являются постоянное повышенное напряжение (например, 135 В, 270 В или 540 В) или переменное повышенное (стабилизированное или регулируемое) трехфазное (или однофазное) напряжение стабильной или регулируемой частоты (например, в пределах 115/200 В...250/440 В, 360...800 Гц или 0...115/200 В, 0...400 Гц). Кроме того, ИБП должен обеспечивать быструю зарядку питающей батареи (аккумуляторной или суперконденсаторной).

В этой связи к импульсному преобразователю для указанных ИБП предъявляются по меньшей мере следующие специфические требования:

- обратимость (двунаправленность) преобразования электроэнергии;
- гальваническая (трансформаторная) развязка между внешними выводами; при этом нежелательны специальные устройства антيناesyщающего симметрирования вольт-секундных параметров цепей питания трансформаторов;
- минимальное суммарное падение напряжения на полупроводниковых ключах и диодах в низковольтном силовом контуре (не более 1...1,5 В) при номинальном питающем токе: $I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/28 \text{ В}$ (важнейшее условие для приемлемого КПД);
- наличие нерассеивающих демпферно-снабберных цепочек (ДСЦ) с минимальной реактивной мощностью, гарантирующих защиту ключей от перенапряжений с обеспечением мягкой коммутации (при нулевом токе или напряжении) для снижения тепловых потерь и помехоизлучений;
- минимальные пульсации внешних токов для исключения электролитических фильтровых кон-

денсаторов с низкой надежностью и снижения помехоизлучений.

Авторами предлагаются схемотехнические решения для преобразователей, удовлетворяющих перечисленным базовым требованиям, защищенные приоритетом РФ и выгодно отличающиеся от вариантов, приведенных в [1] и других публикациях [5—8].

Упрощенная силовая схема преобразователя

На рис. 1 приведена упрощенная силовая схема трансформаторного многофункционального импульсного преобразователя (ТМИП) для ИБП авиакосмического назначения. Схема содержит: два однотипных обратимых конверторно-инверторных модулятора ОКИМ_{1,2} и двухсимисторный циклоконвертор VS₃₋₄—VS₅₋₆, разделенные трехобмоточным трансформатором Т и зашунтированные со стороны внешних выводов U₁, U₂, U₃, U₄ фильтровыми конденсаторами C₁, C₂, C₃, C₄. Каждый из ОКИМ составлен из последовательно между собой соединенных транзисторного ключа VT, балластного дросселя L и диодно-тиристорной стойки VD—VS. Дроссели L₁ и L₂ могут иметь общий магнитопровод (показан пунктиром) для снижения пульсации внешних токов за счет взаимоиндуктивной связи М.

Основной топологический скелет ОКИМ имеет прототипом топологию однонаправленной так называемой трансформаторной схемы Кука [2, 3]. Помимо обеспечения двунаправленности и расширения функциональных возможностей за счет функции низкочастотного регулируемого инвертора на базе циклоконвертора с высокочастотным питанием, в приведенной схеме исправлена существенная ошибка, допущенная С. Куком и С. Ненаховым и перечеркивающая работоспособность схемы: неучет индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора, ЭДС самоиндукции которых не позволяет выключать силовой транзистор VT без недопустимых перенапряжений на нем. Если возложить функцию утилизации энергии этих индуктивностей только на снабберный конденсатор C_{сн}, шунтирующий ключ, то, во-первых, необходимо обеспечить нерассеивающую (тепло) его разрядку, а во-вторых, найти способ снижения его реактивной мощности (особенно при коэффициенте трансформации, существенно отличном от единицы). Указанная утилизация энергии индуктивностей рассеяния трансформатора и индуктивностей демпферных дросселей L_{д1,2} обеспечивается введением силовых диодно-тиристорных стоек VD_{1,2}—VS_{1,2} и разрядных тиристоров (VS_{11,12}), подключенных через снаббер-

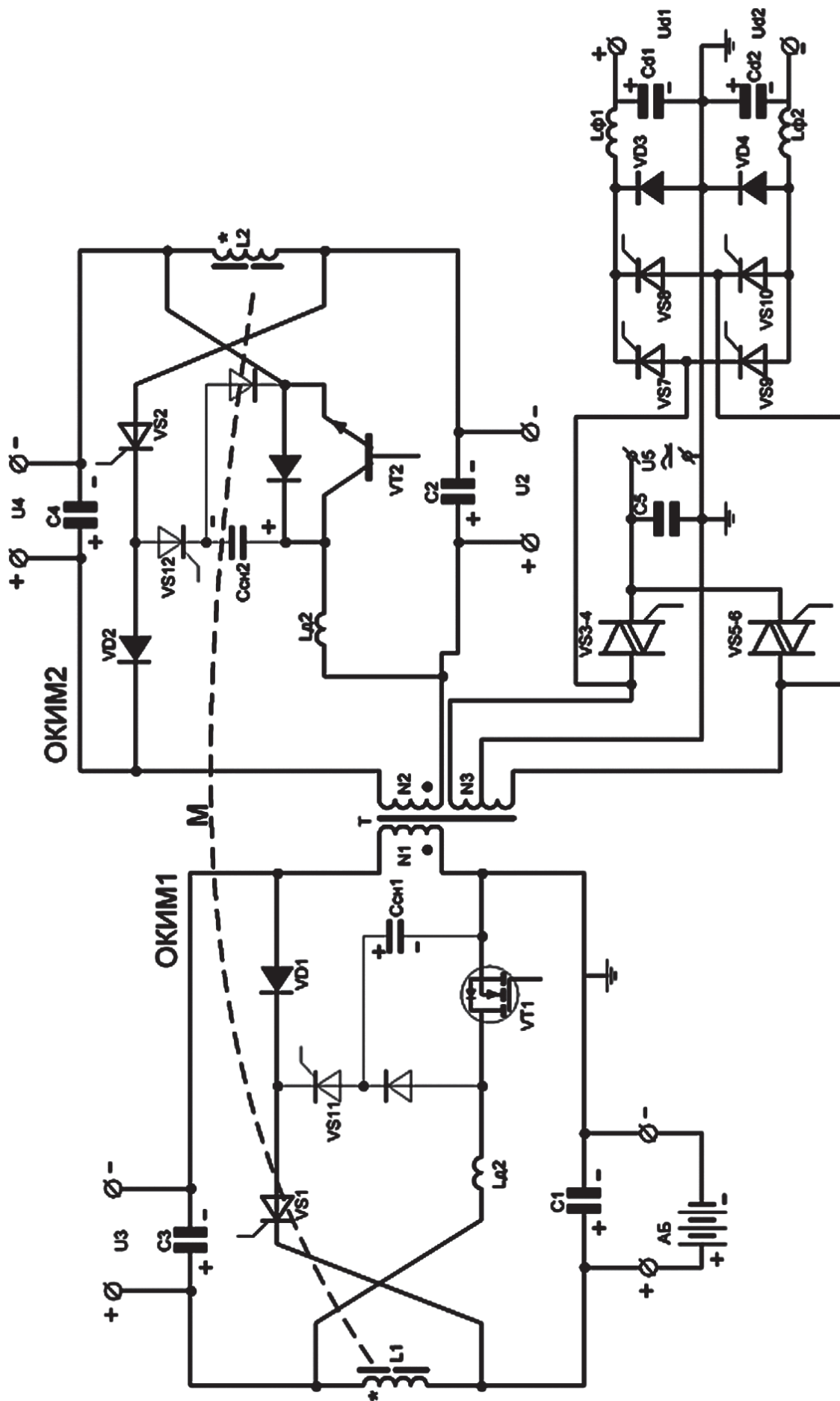


Рис. 1. Упрощенная силовая схема трансформаторного импульсного преобразователя для источника бесперебойного питания

ные конденсаторы ($C_{сн1,2}$) к силовым выводам ключей.

Условием непрерывности тока балластного дросселя L_1 , как и в известных полярно-инвертирующих повышающе-понижающих непосредственных конверторах, является соотношение

$$U_3 = \frac{\gamma}{1-\gamma} \cdot U_1,$$

где $\gamma = t_{и}/T_{шм}$ — относительная длительность (коэффициент заполнения) импульса при широтно-импульсной модуляции с периодом $T_{шм}$.

Работа упрощенной силовой схемы преобразователя

К выводам фильтра C_1 подключают низковольтную аккумуляторную или суперконденсаторную батарею (АБ), например, с напряжением $U_1 = 28$ В. К выводам фильтра C_2 подключают униполярное звено постоянного повышенного напряжения (ЗППН), например, с напряжением $U_2 = 270$ В. Промежуточные балластные (накопительные) конденсаторы C_3 и C_4 в общем случае могут быть нагружены или нет. К выводам фильтра C_5 подключают однофазную нагрузку низкочастотного переменного тока со стабильной или регулируемой амплитудой, например, стабилизированные: $U_{сампл} = 165$ В, 400 Гц или регулируемые: 0...165 В, 0...400 Гц (для регулируемого асинхронного или синхронного приводного двигателя). В исходном состоянии фильтровые (накопительные) конденсаторы C_3 и C_4 заряжены до напряжений U_1 и U_2 соответственно, через обмотки дросселей и трансформатора.

В режиме прямого преобразования на управляющем выводе ключа VT_1 формируются высокочастотные прямоугольные включающие импульсы с постоянным периодом $T_{шм}$ и относительной длительностью $\gamma = t_{и}/T_{шм}$, регулируемой в зависимости от отклонения регулируемого параметра в цепи обратной связи от эталонного сигнала блока управления.

В течение произвольного периода $T_{шм}$ на первом этапе с длительностью $t_{и}$ полное потокосцепление балластных дросселей L_1 и L_2 нарастает (этап $d\Psi/dt > 0$) вместе с токами в цепях $C_1-L_1-VT_1-C_1$; $C_3-VT_1-N_1-C_3$ и $N_2-C_2-L_2-C_4-N_2$ («прямоходовая зарядка» фильтра C_2). После выключения ключа VT_1 и включения вентиля VS_1 указанное полное потокосцепление частично (или полностью) спадает (этап $d\Psi/dt < 0$) за время $T_{шм} - t_{и} = (1 - \gamma) \cdot T_{шм}$ вместе с токами в цепях: $L_1-C_3-VD_1-VS_1-L_1$, L_2 -(об-

ратный диод ключа VT_2)- C_2-L_2 («обратноходовая зарядка» фильтра C_2) и $N_1-VD_1-VS_1-C_1-N_1$ (рекуперация энергии индуктивности рассеяния трансформатора, не предусмотренная в [2,3]), а после его обнуления имеем импульс тока в цепи $L_1-C_3-N_1-C_1-L_1$ и трансформируемый импульс тока в цепи — N_2-C_4 -(обратный диод ключа VT_2)- $L_{д2}-N_2$. Далее указанные процессы высокочастотно-периодически качественно повторяются. При этом в третьей обмотке N_3 трансформатора T индуцируется высокочастотная прямоугольно-переменная ЭДС, которая с помощью циклически реверсируемого выпрямления (в циклоконверторе $VS_{3-4}-VS_{5-6}$) формирует низкочастотный переменный ток в цепи фильтра C_5 , интегрируя который, фильтр формирует выходное синусоидальное напряжение $U_5(t)$.

Мягкая коммутация транзисторных ключей (включение при нулевом токе и выключение при нулевом напряжении) обеспечивается за счет нерассеивающих демпферно-снабберных цепочек ($L_{д}-C_{сн}$), подключенных к ключам. Зарядка снабберных конденсаторов происходит после выключения соответствующих ключей, а их полная разрядка — после включения ключей и соответствующих тиристорных вентилей по цепям: $C_{сн1}-VS_{11}-VS_1-L_1-L_{д2}-VT_1-C_{сн1}$ и $C_{сн2}-L_{д2}-VT_2-L_2-VS_{1,2}-C_{сн2}$. При этом энергия конденсаторов передается балластным реакторам для дальнейшего использования в нагрузке. Указанная коммутация существенно снижает динамические тепловые потери в ключах и помехоизлучения (улучшая КПД и ЭМС).

Как и в упомянутой схеме Кука, в рассмотренной схеме при определенных значениях коэффициентов связи и трансформации балластных реакторов (трансреактора L_1-L_2) могут быть существенно снижены пульсации внешних токов, а следовательно, улучшено качество потребляемой и преобразованной электроэнергии [3]. Отметим также, что, пожертвовав снижением пульсаций и поменяв местами начало и конец одного из дросселей, можно получить другое существенное достоинство схемы: быстрое действие процессов переключений направлений преобразования за счет однополярности (отсутствия реверса) потокосцепления трансреактора при переключениях направления преобразователя, что повышает качество переходных процессов в замкнутой системе регулирования или стабилизации выходного напряжения.

В [4] предложено вместо униполярного звена повышенного постоянного напряжения (например, ± 270 В или ± 540 В) использовать в бортовых ЭЭК дифференциальное звено с заземленным среднепотенциальным выводом (ДЗППН, например, 0 ± 135 В или 0 ± 270 В), имеющее ряд преимуществ:

- снижение рабочего напряжения и интенсивности старения изоляции кабелей, обмоток электромагнитных элементов и др. устройств;

- непосредственную пригодность для питания полумостовых импульсных инверторов, в особенности трехфазных (бестрансформаторных, с заземленной нейтралью);

- упрощение и повышение надежности подсистемы распределения с аппаратами защиты, коммутации и регулирования;

- повышение электробезопасности для обслуживания;

- снижение вдвое рабочих и максимально допустимых напряжений полупроводниковых ключей, упрощающее реализацию их импортозамещения, и др.

В рассматриваемой схеме ТМИП для питания ДЗППН на базе двухконденсаторной фильтровой стойки $C_{d1}-C_{d2}$ с напряжением $0 \pm U_{d1,2}$ предусмотрен управляемый мостовой выпрямитель VS_{7-10} с питанием либо от той же третьей обмотки N_3 трансформатора, либо от дополнительной (четвертой) обмотки.

Для получения трехфазного переменного напряжения следует к циклоконвертору $VS_{3,4}-VS_{5,6}$ (для фазного напряжения U_{A-N}) добавить два аналогичных (для фазных напряжений U_{B-N} и U_{C-N}) с их питанием либо от той же третьей обмотки N_3 , либо от двух дополнительных.

Ближайшим прототипом рассмотренной схемы ТМИП является схема, опубликованная в [2, 3]. Основным и достаточно радикальным отличием рассмотренной схемы от прототипа является ее работоспособность благодаря наличию диодно-вентильной ветви (VD_1-VS_1), обеспечивающей цепь для замыкания двух токов по цепям: $L_1-C_3-VD_1-VS_1-L_1$ и $N_1-VD_1-VS_1-C_1-N_1$ за счет ЭДС самоиндукции индуктивностей L_1 и рассеяния трансформаторной обмотки N_1 после выключения ключа VT_1 , работающего в релейном режиме. В противном случае понадобилось бы не только обязательно вводить в схему снабберный конденсатор C_{CH1} для защиты ключа от перенапряжения, но и рассчитать его на существенную реактивную мощность при частоте сто-процентных пульсаций напряжения с частотой $1/T_{ШИМ}$ (более 20 кГц).

К менее радикальным отличиям, но достаточно существенным достоинствам предложенной здесь схемы можно отнести следующие:

- обратимость (двунаправленность) преобразования по отношению к униполярному звену постоянного повышенного напряжения (ЗППН);

- обеспечение питанием дифференциального звена постоянного повышенного напряжения (ДЗППН) и нагрузок регулируемого низкочастотного переменного напряжения, в том числе трехфазного (например, синхронных или асинхронных электродвигателей, в частности авиабортового стартер-генератора);

- обеспечение мягкой коммутации силовых ключей, а следовательно — снижение коммутационных тепловых потерь и помехоизлучений.

Модернизированная схема ТМИП для ИБП с питанием трехфазных электроприводов

На рис. 2 приведена силовая схема ТМИП с униполярным и дифференциальным звеньями постоянного повышенного напряжения (УЗППН и ДЗППН) на базе обратимого трансформаторного импульсного конвертора (ОТИК) с трансформаторным звеном высокой частоты (ТЗВЧ), 3-фазного циклоконвертора (3-ф. ЦК) и обратимого выпрямительно-инверторного преобразователя (ОВИП) для питания регулируемых электроприводов с рекуперативным торможением (магнитоэлектрического синхронного двигателя — МЭСД) от низковольтных аккумуляторных и/или суперконденсаторных батарей (АБ).

По сравнению со схемой ТМИП на рис.1 эта схема имеет расширенные функциональные возможности за счет 3-ф. ЦК и ОВИП, более высокий КПД за счет трансреакторного преобразования (прямо- и обратногохода через L_1-L_2 с токозамыкающими паузами) и за счет обеспечения «мягкой» коммутации модуляторных ключей, снабженных нерассеивающими демпферно-снабберными цепочками (L_D-C_{CH}), а также сниженные помехоизлучения. Кроме этого, схема обладает повышенной устойчивостью за счет введения дополнительных независимых параметров регулирования — коэффициентов заполнения импульсов ШИМ для шунтирующих ключей VT_3, VT_4, VT_5, VT_6 . Эти ключи позволяют одновременно с регулированием (стабилизацией) выходного напряжения регулировать уровни напряжений на буферных конденсаторах C_3, C_4 , полное потокосцепление Ψ трансреактора (L_1-L_2) и выходное напряжение ТЗПЧ. Потокосцепление Ψ однополярное (без реверса), благодаря чему обеспечивается безынерционность переключений направлений преобразования, т.е. высокое качество регулирования в замкнутой системе управления.

Приводной магнитоэлектрический синхронный двигатель (МЭСД) имеет два канала питания: а) пофазно-регулируемыми напряжениями, формируемыми 3-ф. ЦК, и б) линейными напряжениями,

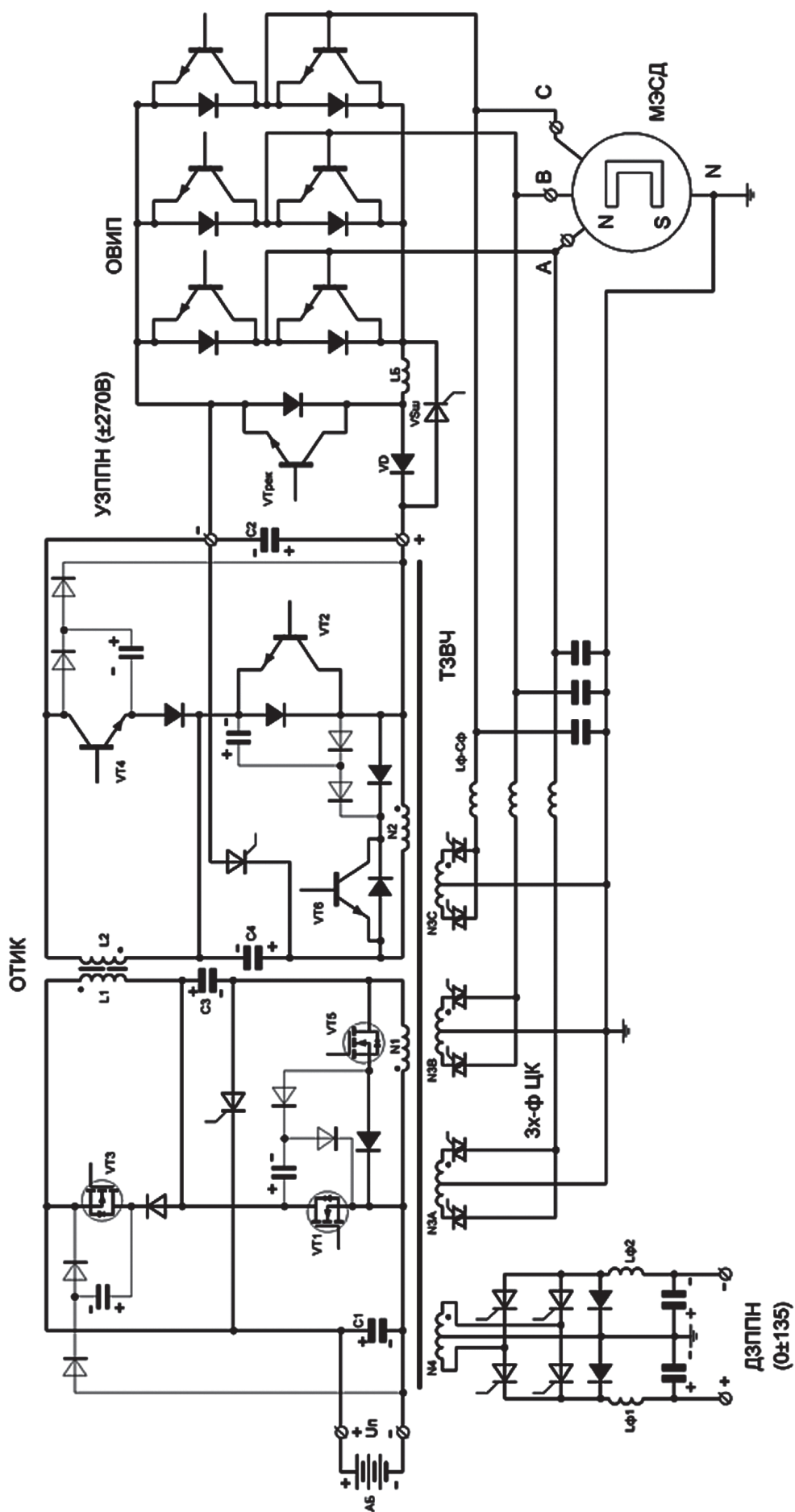


Рис. 2. Силовая схема ТМИП с униполярным и дифференциальным звеньями постоянных повышенных напряжений (УЗППН и ДЗППН) на базе обратимого трансформаторного импульсного конвертора (ОТИК), 3-фазного циклоконвертора (3-ф ЦК), управляемого выпрямителя (УВ) и обратимого выпрямительно-инверторного преобразователя (ОВИП) для питания регулируемых электроприводов с рекуперативным торможением от низковольтных аккумуляторных и/или суперконденсаторных батарей

формируемыми обратимым ОВИП, который также используется для рекуперативного торможения двигателя с возвратом энергии в УЗППН и в АБ (через ОТИК). Для расширения скоростного диапазона эффективного торможения (вплоть до остановки) ОВИП шунтирован повышающим (бустерным) импульсным модулятором на базе рекуперативного ключа $VT_{рек}$ и балластного дросселя L_B с шунтирующим тиристором $VS_{ш}$.

Выводы

Предложенные схемотехнические решения для трансформаторных многофункциональных импульсных преобразователей удовлетворяют всем базовым требованиям, предъявляемым к авиакосмическим ИБП, входящим в состав ЭЭК и СЭС, в частности с модульно-масштабируемой архитектурой. Решения защищены приоритетом РФ.

Библиографический список

1. Резников С.Б., Климова С.Р., Харченко И.А., Смирнов В.Н., Савостьянов В.В. Резервно-аккумуляторные источники бесперебойного питания для автономных и сетевых систем электроснабжения со звеном постоянного повышенного напряжения // Силовая электроника. 2016. № 2. С. 64-68.
2. Cuk S. DC-TO-DC SWITCHING CONVERTER. Patent US № 4.184.197. JAN.15, 1980.
3. Кук С., Ненахов С. Новый DC/DC-преобразователь с нулевыми пульсациями и интегрированными магнитопроводами // Силовая электроника. 2004. № 2. С. 62-64.
4. Резников С.Б., Бочаров В.В., Харченко И.А. Электромагнитная и электроэнергетическая совместимость систем электроснабжения и вторичных источников электропитания полностью электрифицированных самолетов / Под ред. С.Б. Резникова. — М.: Изд-во МАИ, 2014. — 160 с.
5. Щетимин В.Е., Аверин С.В. Алгоритм формирования выходного напряжения многофазного инвертора с синусоидальной аппроксимацией включения ячеек // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 4. С. 159-167.
6. Осирко В.О., Семенов В.Л., Павлов А.П. Применение демпфирующих цепей в импульсном источнике питания магнетронных распылительных систем // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 4. С. 168-176.
7. Орехов Е. Сравнение трансформаторных и бестрансформаторных ИБП // Современные технологии автоматизации. 2014. № 4. С. 104-108.
8. Климов В.П., Портнов А.А., Зуенко В.В. Топологии источников бесперебойного питания переменного тока (ИБП) // Электронные компоненты. 2003. № 7. С. 34-41.

TRANSFORMER MULTIFUNCTION SWITCHED MODE CONVERTERS FOR ONBOARD AIRSPACE POWER SOURCES

Reznikov S.B.^{1*}, Kharchenko I.A.^{2**}, Marchenko M.V.^{3***}, Zhegov N.A.^{3****}

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University),

MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

² Central Research and Development Testing Institute of the Engineering Troops

of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

CRDTI ET the Russian Defense Ministry, Nakhabino-2, Moscow region, 143432, Russia

³ Moscow Experimental Design Bureau "Mars",

16, 1-st Shemilovskiy lane, Moscow, 127473, Russia

* e-mail: rezn41@mail.ru

** e-mail: ihar@mail333.com

*** e-mail: mfallout@yandex.ru

**** e-mail: nzhegov@yandex.ru

Abstract

The paper envisages circuit solutions for transformer multifunction switched mode converters meant for uninterruptible power sources as constituent parts of onboard aerospace electric power facilities and electric power supply systems. All solutions are protected by the Russian Federation priority. The paper is of interest for

a wide range of specialists working in the field of aerospace onboard power electronic equipment design.

To power actuating brushless motors (aircraft onboard equipment in particular) the voltage higher than that provided by batteries, solar or supercapacitor (ionistor) elements is required due to the necessity of

varying magnetic field space forming (either circular or linear) by currents flowing through flexible wires. Ensuring relatively higher voltage level only through series (stacked) low-voltage units, or series connection of the above said batteries with significant supply currents is hampered technologically, and leads to mass and size, reliability and cost parameters reduction. For example, in case of “stacked” units leads burning-out (or break) they should be shunted by diodes with low-voltage conducting junctions. In case of breakdown at the leads of a parallel link, it should be provided with disconnecting fuses. Thus, to increase the voltage level of a primary relatively low-voltage source switched mode converters (SMC or DC/DC converters) based on field-effect transistor switches (MOSFET) with low $R_{ds(on)}$ should be used. They should herewith be reversible to provide feeding batteries intensive charging. As a rule, such converters are included in so-called secondary power sources, or stand-by uninterruptible power sources (UPS) fed by batteries [1].

Aerospace uninterruptible power sources included in onboard electric power facilities and electric power supply systems, acquire primary energy from chemical or solar batteries, either form newly developed super capacitor (ionistor) batteries with relatively low voltage (28 V). As a rule, the UPS output voltages herewith are higher DC voltages (such as 135 V, 270 V, or 540 V), or higher AC three-phase (or single phase) voltage (stabilized or regulated) of constant or regulated frequency (e. g., within the limits of 115/200 V, 360-800 Hz, or 0-115 V, 0-400 Hz). Besides, UPS should provide fast feeding battery charging (accumulator or supercapacitor).

In this regard, at least specific requirements are placed on the above mentioned UPSs.

Keywords: power electronics, switched mode converter, uninterruptible power source, transformer converter and inverter, airspace secondary power supply, aircraft electric drive.

References

1. Reznikov S.B., Klimova S.R., Kharchenko I.A., Smirnov V.N., Savost'yanov V.V. *Silovaya elektronika*, 2016, no. 2, pp. 64-68.
2. Suk S. *Patent US № 4.184.197*, 15.01.1980.
3. Kuk S., Nenakhov S. *Silovaya elektronika*, 2004, no. 2, pp. 62-64.
4. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kharchenko I.A. *Elektromagnitnaya i elektroenergeticheskaya sovmestimost' sistem elektrosnabzheniya i vtorichnykh istochnikov elektropitaniya polnost'yu elektrifitsirovannykh samoletov* (Electromagnetic and ehlectropower compatibility supply systems and secondary sources of power ehlectric aircraft), Moscow, MAI, 2014, 160 p.
5. Shchetimin V.E., Averin S.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 159-167.
6. Oskirko V.O., Semenov V.L., Pavlov A.P. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 168-176.
7. Orekhov E. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*, 2014, no. 4, pp. 104-108.
8. Klimov V.P., Portnov A.A., Zuenko V.V. *Elektronnye komponenty*, 2003, no. 7, pp. 34-41.