

УДК 621.314.58

КОМБИНИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС С МОДУЛЬНО-МАСШТАБИРУЕМОЙ АРХИТЕКТУРОЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОЛНОСТЬЮ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ САМОЛЁТОВ

Резников С.Б.^{1*}, Киселёв М.А.^{2**}, Морошкин Я.В.^{2***},
Мухин А.А.^{2****}, Харченко И.А.^{3*****}

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

² Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем,
ГосНИИАС, ул. Викторенко, 7, Москва, 125319, Россия

³ Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск
Министерства обороны Российской Федерации,
«ЦНИИИ ИВ» МО РФ, Нахабино-2, Московская обл., 143432, Россия

* e-mail: rezn41@mail.ru

** e-mail: makiselev@2100.gosniias.ru

*** e-mail: yvmoroshkin@2100.gosniias.ru

**** e-mail: aamuhin@2100.gosniias.ru

***** e-mail: igor8p5@yandex.ru

Предложена структура комбинированного электроэнергетического комплекса с модульно-масштабируемой архитектурой вторичных источников электропитания для систем электроснабжения (СЭС) полностью электрифицированных самолётов (ПЭС) с повышенной электроэнерговооружённостью на базе унифицированных многофункциональных импульсных преобразователей (МИП). Рассмотрены нетрадиционные схемотехнические решения для МИП с высокой массоэнергетической, надёжностной и технологической эффективностью, защищённые приоритетом РФ. Работа представляется полезной для широкого круга специалистов в области силовой электроники и авиабортовых электроэнергетических комплексов.

Ключевые слова: силовая электроника, многофункциональные импульсные преобразователи, полностью электрифицированный самолёт, обратимый выпрямительно-инверторный преобразователь, двунаправленный инверторно-выпрямительный преобразователь, обратимый импульсный конвертор, двунаправленный преобразователь частоты.

Введение

В настоящее время в РФ и за рубежом ускоренно развивается концепция «полностью (или «более») электрифицированного самолёта» (ПЭС или БЭС), предполагающая замену авиабортовых пневмо- и гидроприводов на электроприводы (или на гибридные электро-гидроприводы), а также исключение приводов постоянной частоты вращения (ППЧВ) магистральных электрогенераторов. В состав электроприводов может входить и электро-трансмиссия бортового шасси на базе мотор-колёс [1, 2]. Суммарная установленная мощность системы электроснабжения (СЭС) для указанных ПЭС (БЭС) может достигать 1,5 МВт (как, например, в СЭС самолёта Боинг-787 с пятью магистральными генераторами с мощностями по 250 кВт, включая генератор вспомогательной силовой установки — ВСУ). Для обеспечения необходимого качества электроэнергии на входах потребителей и взаиморезервирования каналов её распределения должны быть параллельно между собой включёнными, для чего каждый канал должен, помимо центрального распределительного устройства (ЦРУ) низкого напряжения (27 В) с резервной аккумуляторной батареей, содержать звено постоянного повышенного напряжения (ЗППН) 270 В или 540 В в соответствии с ГОСТ [3], не используемого к настоящему времени для питания шин распределительных устройств (РУ) из-за сложности обеспечения бездуговой коммутации (особенно в аварийных быстродействующих выключателях — АБВ) [4]. Таким образом, каждый канал СЭС ПЭС (БЭС) представляет собой самостоятельный комбинированный электроэнергетический комплекс (ЭЭК) постоянно-переменного тока с четырьмя видами центральных и периферийных распределительных устройств (ЦРУ и РУ): 115/200 В, 360...800 Гц; 115/200 В, 400 Гц; +27 В и +270 (540) В, связанных между собой электронными вторичными источниками электропитания (ВИЭП) со следующими функциональными назначениями [5–10]:

1) обратимые выпрямительно-инверторные преобразователи с коррекцией коэффициента мощности и стабилизацией выпрямленного напряжения и амплитуды переменного напряжения (ОВИП-ККМ-СН);

2) двунаправленные инверторно-выпрямительные преобразователи с регулируемым инвертором синусоидального напряжения (ДИВП-РИСН);

3) обратимые импульсные конверторы (ОИК), в частности трансформаторные (ТОИК) с промежуточным звеном высокой частоты (ЗВЧ) и дополнительными циклоконверторами (ЦК), т.е. цикли-

чески реверсируемыми выпрямителями для формирования низкочастотного переменного напряжения;

4) двунаправленные преобразователи частоты (ДИПЧ), в частности со звеном постоянного повышенного напряжения (ЗППН);

5) двунаправленные импульсные регуляторы/стабилизаторы тока/напряжения (ДИР/СТ/Н).

Следует констатировать, что наибольшей производственной, монтажной и эксплуатационной технологичностью обладают ВИЭП с модульно-масштабируемой архитектурой, позволяющей гибко наращивать установочную мощность без дополнительных затрат на новые разработки и модернизации. При этом желательно в качестве базовых модулей ВИЭП использовать так называемые многофункциональные импульсные преобразователи (МИП), совмещающие все вышеперечисленные функции [5–10].

В связи с вышесказанным предлагается к рассмотрению комбинированный ЭЭК с модульно-масштабируемой архитектурой для перспективных ПЭС (БЭС). Предлагаемые схмотехнические решения для ВИЭП с совмещением перечисленных функций защищены приоритетом РФ.

Структура магистрального канала комбинированного ЭЭК

На рис. 1 приведена структура канала комбинированного ЭЭК с модульно-масштабируемой архитектурой на базе унифицированных модулей МИП для СЭС гипотетического ПЭС (БЭС). В схеме используются следующие обозначения:

СУ (ВСУ) — силовая установка (авиадвигатель или вспомогательная);

АР — аварийный расцепитель приводного вала (например, срезаемая или утапливаемая шпонка);

ЦРУ_{ц/о}, РУ_{н/о}, РУ_{х/о} — центральное и периферийные распределительные устройства (центрального, носового и хвостового отсеков);

АБВ — аварийный быстродействующий выключатель;

Ст-Г (МЭМ) — магистральный стартер-генератор (магнитоэлектрическая машина);

СК и ЭИ ПОС — система кондиционирования и электроимпульсная противообледенительная система;

РАП — розетка (разъём) аэродромного питания;

ЭМ-ЭТ — электромотор с электроторможением («мотор-колесо») электротрансмиссии шасси;

ДПЧ-ЗПН — двунаправленный преобразователь частоты со звеном постоянного напряжения;

ДЗППН — дифференциальное звено постоянного повышенного напряжения;

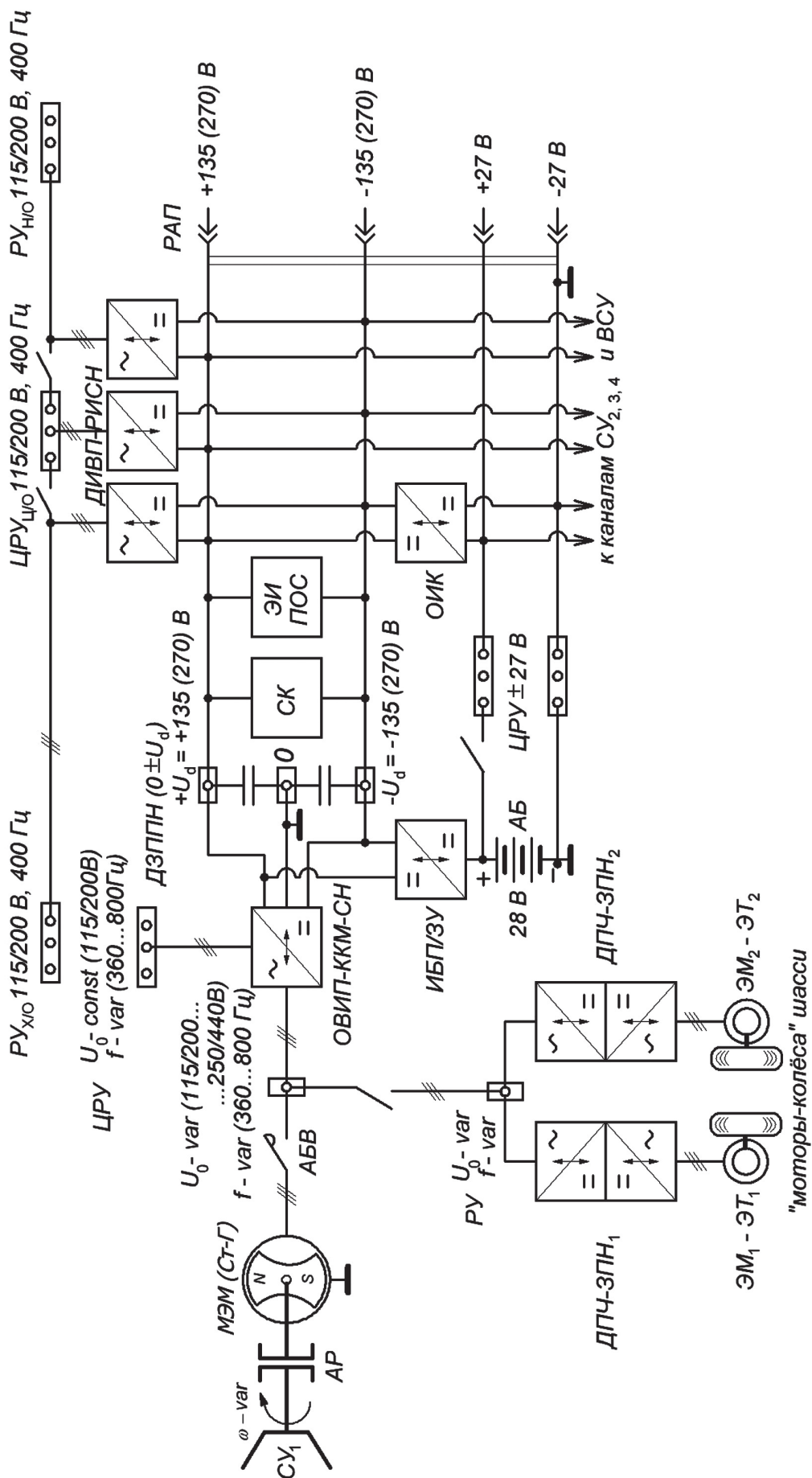


Рис. 1. Структура канала комбинированного электроэнергетического комплекса (КЭЭК) с модульно-масштабируемой архитектурой для СЭС гипотетического ПЭС (БЭС) на базе унифицированных модулей многофункциональных импульсных преобразователей (МИП)

ОВИП-ККМ-СН — обратимый выпрямительно-инверторный преобразователь с коррекцией коэффициента мощности и стабилизацией напряжений (выпрямленного и амплитудного);

ОИК — обратимый импульсный конвертор (непосредственный или трансформаторный, с ЗВЧ);

ДИВП-РИСН — двунаправленный инверторно-выпрямительный преобразователь с регулируемым инвертором синусоидального напряжения;

ИБП/ЗУ — источник бесперебойного питания с зарядным устройством [11];

АБ — аккумуляторная батарея и/или суперконденсаторная (ионисторная) батарея.

Структура предусматривает возможность параллельного включения каналов, а также многократное взаиморезервирование цепей питания жизненно важных потребителей. В ней используется предложенное в [2] дифференциальное звено постоянного повышенного напряжения (ДЗППН $0+U_d$), имеющее существенные преимущества по сравнению с униполярным ЗППН, используемым в СЭС самолёта Боинг-787. Структура позволяет унифицировать составляющие её многофункциональные импульсные преобразователи (МИП).

Многофункциональные импульсные преобразователи для комбинированных электроэнергетических комплексов с модульно-масштабируемой архитектурой

На рис. 2 приведены силовые схемы модулей однофазных МИП с дифференциальным звеном постоянного напряжения (ДЗППН: $0 \pm U_d$) в двух вариантах: а) вариант с $U_d > U_0^{\text{var}}$ и б) вариант с произвольным соотношением U_d и U_0^{const} . МИП предназначен для выполнения следующих функций:

1) обратимый импульсный конвертор (ОИК) для взаимосвязи униполярного (с возможным реверсом) напряжения и дифференциальных (взаимовыравниваемых) напряжений ($\pm U_{A1-N} \leftrightarrow 0 \pm U_d$);

2) обратимый выпрямительно-инверторный преобразователь с коррекцией коэффициента мощности (ОВИП-ККМ);

3) двунаправленный инверторно-выпрямительный преобразователь с инвертором синусоидального напряжения или тока (ДИВП-ИСН/Т);

4) стабилизатор амплитуды переменного напряжения (САН: $U_0^{\text{var}} \rightarrow U_0^{\text{const}}$) с учётом реактивной и рекуперативной мощности;

5) двунаправленный преобразователь частоты (ДПЧ) на базе последовательно-встречно включённых ОВИП-ИСН/Т.

Для синтеза трёхфазных вариантов с общим заземлением нейтрали и нулевого вывода дифференциального звена постоянного напряжения (N и 0) каждая из схем тиражируется в трёх экземплярах.

Схемы в обоих вариантах содержат: выводы переменного фазного напряжения с нестабильной амплитудой ($A1-N$) для подключения источника электропитания или потребителя переменного тока с нестабильным, в частности — регулируемым напряжением, например, фазной обмотки магистрального стартер-генератора с возбуждением от постоянных магнитов; выводы дифференциального звена постоянного напряжения (ДЗППН: $0 \pm U_d$) для параллельного включения аналогичных звеньев других каналов КЭЭК; выводы переменного напряжения со стабильной амплитудой ($A2-N$) для подключения потребителя переменного тока со стабильной амплитудой напряжения, например, нагревательного, светотехнического и другого оборудования, некритичного к стабильности частоты питающего напряжения; обратимый полумостовой модулятор (ОП/ММ) на базе ключевых транзисторов (*IGBT* или *MOSFET*), снабжённых нерассеивающими демпферно-снабберными цепочками ($L_d-C_{сн}$) для «мягкой» коммутации, защиты от перенапряжений и снижения помехоизлучений, уравнительный делитель напряжения (УДН) на базе двухключевого полярно-инвертирующего ОИК — «транспортёра заряда» ($VT_{yp1,2}-L_{yp1,2}$) и стабилизатор амплитуды напряжения (САН) на базе двухтиристорного коммутатора ($VS_{1,2}$) и двухключевого рекуператорного модулятора ($VT_{c1,2}$), а также накопительно-демодуляторный двухсекционный реактор (трансреактор): $L_{н/д1,2}$ для формирования синусоидальной формы одного из внешних токов.

На рис. 3 приведена схема канала авиабортовой комбинированной СЭС с резервно-аккумуляторным ИБП с трансформаторным звеном высокой частоты (ЗВЧ) и с двумя звеньями постоянных повышенных напряжений: униполярным — УЗППН 270 В (540 В) и дифференциальным — ДЗППН 0 ± 135 В (0 ± 270 В) для БЭС и ПЭС. Канал соответствует магистральному стартер-генератору (Ст-Г) с приводом от силовой установки (СУ) через аварийный расцепитель (АР) для предотвращения пожара при коротком замыкании в якорной обмотке магнитоэлектрической машины (МЭМ).

Канал содержит: аварийный быстродействующий выключатель (АБВ); трёхфазный Виенна-выпрямитель с корректором коэффициента мощности и стабилизатором амплитуды напряжения (В-В-

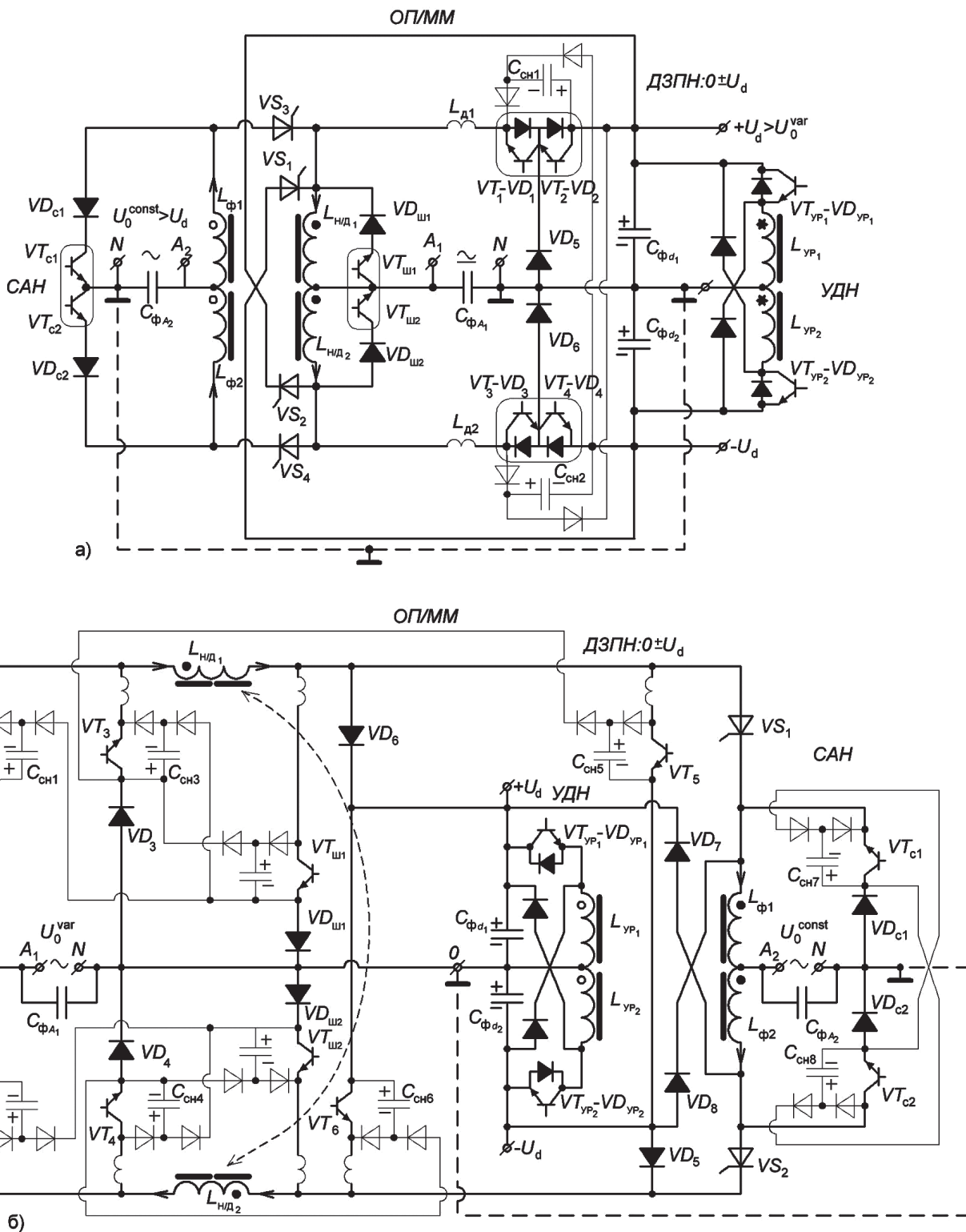


Рис. 2. Силовые схемы однофазных модулей многофункциональных импульсных преобразователей (МИП) (с функциями: ОИК УН/ДИФ, ОИК-УДН, ОВИП-ККМ, ДИВП-ИСН/Т, САН ($U_0^{var} \rightarrow U_0^{const}$) с дифференциальным звеном постоянного напряжения (ДЗПН: $0 \pm U_d$): а — вариант с $U_d > U_0^{var}$; б — вариант с произвольным соотношением U_d и U_0^{var} и $U_d \geq U_0^{const}$

ККМ-САН), имеющий входной индуктивно-емкостный фильтр ($L_{\phi}-C_{\phi}$); выходной дифференциальный емкостный фильтр ($C_{\phi4}-C_{\phi5}$) и двунаправлен-

ные электронные ключи (ДЭК); обратимый выпрямительно-инверторный преобразователь (ОВИП) с входным индуктивным и выходным емкостным

фильтрами ($L_{\text{фА,В,С}}$ и $C_{\text{ф3}}$) и выходным повышающим импульсным модулятором ($VT_{\text{рек}}-L_{\text{В}}-VS_{\text{ш}}$) для рекуперативного торможения электроприводных двигателей (ЭП) в широком скоростном диапазоне — вплоть до остановки); обратимый трансформаторный импульсный конвертор (ОТИК) с двумя импульсными модуляторами ($ИМ_1$ и $ИМ_2$), трансреактором (L_1-L_2) и трансформатором (звеном высокой частоты): Т(ЗВЧ), имеющим две модуляторные обмотки (N_1, N_2) и четыре демодуляторные обмотки (N_3, N_A, N_B, N_C) для питания управляемого тиристорного выпрямителя (УВ) и трёх однофазных симисторных циклоконверторов ($ЦК_{\text{А,В,С}}$), аккумуляторную батарею (АБ), розетку (разъём) аэродромного питания (РАП) и три центральных распределительных устройства (ЦРУ ± 27 В; ЦРУ 115/200 В; 400 Гц и ЦРУ 115/200 В, 360...800 Гц).

Выбор в качестве стартер-генератора (Ст-Г) магнитоэлектрической машины (МЭМ) с высокоэнергетическими постоянными магнитами определяется главным образом возможностью реализации его безредукторной конструкции, встроенной в авиадвигатель без собственных подшипников и с увеличенным (например, втрое — до 1,2 мм) воздушным зазором, к величине которого постоянные магниты не критичны (так как имеют единичную относительную магнитную проницаемость).

Наличие униполярных и дифференциальных звеньев постоянного повышенного напряжения (УЗППН и ДЗППН) позволяет использовать параллельное включение каналов СЭС (в том числе канал с питанием от Ст-Г вспомогательной СУ), но не предполагает (в настоящее время) использовать систему распределения ППН из-за проблем бездуговой коммутации (аналогично применению УЗППН ± 270 В на самолётах Боинг-787).

Трансформаторное звено высокой частоты позволяет:

- использовать гальваническую развязку между АБ, УЗППН, ДЗППН, ЦРУ 115/200 В, 400 Гц и 115/200 В, 360...800 Гц;

- реализовать циклоконверторное формирование трёхфазного переменного напряжения стабильной частоты (за счёт циклически-реверсивных выпрямителей);

- согласовать по токам и напряжениям электронных ключей низковольтные (сильноточные) и высоковольтные импульсные преобразователи для повышения их надёжности и КПД;

- осуществлять пофазное регулирование (стабилизацию) трёхфазного и дифференциальных напряжений и соответствующее повышение качества электроэнергии СЭС.

Благодаря топологической симметрии импульсных модуляторов ($ИМ_{1,2}$) ОТИК его работу можно рассмотреть только для прямого преобразования электроэнергии: от АБ до УЗППН.

В исходном состоянии буферные конденсаторы ($C_{\text{Б1}}$ и $C_{\text{Б2}}$) заряжены до соответствующих напряжений: 27 В и 270 (540) В с полярностями, указанными на рисунке. На управляющие выводы низковольтных ключей (VT_1, VT_3 и VT_5) поступают синхронизированные по фронтам высокочастотные прямоугольные импульсы с постоянным периодом широтно-импульсной модуляции ($T_{\text{шим}}$) и с регулируемой длительностью: $t_{\text{и}} = \gamma_{\text{и}} T_{\text{шим}}$ (для VT_1), $\Delta t_{\text{п3}} = \gamma_{\text{п3}} T_{\text{шим}}$ (для VT_3), $\Delta t_{\text{п5}} = \gamma_{\text{п5}} T_{\text{шим}}$ (для VT_5), где $\gamma_{\text{и}}, \gamma_{\text{п3}}, \gamma_{\text{п5}}$ — относительные длительности (коэффициенты заполнения) импульсов для реализации интервалов $T_{\text{шим}}$: а) нарастания полных потокосцеплений L_1-L_2 и Т ($d\Psi/dt > 0$) — $t_{\text{и}}$; б) приблизительного сохранения этих потокосцеплений ($d\Psi/dt \approx 0$) в течение токозамыкающих пауз:

$$(\Delta t_{\text{п3}} - t_{\text{и}}) = (\gamma_{\text{п3}} - \gamma_{\text{и}}) T_{\text{шим}};$$

$$(\Delta t_{\text{п5}} - t_{\text{и}}) = (\gamma_{\text{п5}} - \gamma_{\text{и}}) T_{\text{шим}}$$

для обмоток L_1 и N_1 соответственно.

При включении ключа VT_1 (а также ключей VT_3 и VT_5) одновременно нарастают токи в цепях: $C_{\text{ф1}}-L_1-VT_1-C_{\text{ф1}}$; $C_{\text{Б1}}-VT_1-N_1-C_{\text{Б1}}$; $N_2-C_{\text{ф2}}-L_2-C_{\text{Б2}}-N_2$ (прямоходовая трансформация), что соответствует этапу: $d\Psi/dt > 0$ для трансреактора L_1-L_2 и трансформатора Т. Затем ключ VT_1 выключается, а ключи VT_3 и VT_5 остаются включёнными, после чего токи от ЭДС самоиндукции индуктивностей рассеяния трансреактора и трансформатора приблизительно сохраняются в цепях: $L_1-VT_3-L_1, N_1-VT_5-N_1$ и частично спадают в цепи: $N_2-C_{\text{ф2}}-L_2-C_{\text{Б2}}-N_2$ (обратноходовая трансформация), что соответствует началу этапа: $d\Psi/dt < 0$ для L_1-L_2 и Т. Затем ключ VT_5 выключается, а ключ VT_3 остаётся включённым и синхронно включается вентиль VS_1 , после чего спадает ток в цепи: $N_1-VS_1-C_{\text{ф1}}-N_1$ (рекуперация энергии индуктивности рассеяния) и продолжают протекать вышеуказанные токи. И наконец, выключается ключ VT_3 и включается вентиль VS_2 , после чего полное потокосцепление трансреактора частично (или полностью) спадает (этап $d\Psi/dt < 0$), а полное потокосцепление трансформатора спадает и реверсируется вместе с токами в цепях: $L_1-C_{\text{Б1}}-VS_1-L_1$ (зарядка $C_{\text{Б1}}$); $L_1-C_{\text{Б1}}-N_1-C_{\text{ф1}}-L_1$; $L_2-VS_2-C_{\text{Б2}}-L_2$ (обратноходовая зарядка $C_{\text{Б2}}$) и $L_2-C_{\text{ф2}}-N_2-C_{\text{Б2}}-L_2$.

Далее указанные процессы высокочастотно-периодически качественно повторяются, трансформируя в обмотках N_3 и $N_{A,B,C}$ трансформатора высокочастотные переменные ЭДС, питающие мостовой управляемый выпрямитель (УВ) и двухсигисторные фазные циклоконверторы (ЦК $_{A,B,C}$).

Благодаря регулированию взаимонезависимых параметров ШИМ: $\gamma_{и}$, $\gamma_{п3}$, $\gamma_{п5}$ с помощью замкнутой системы управления (с цепями обратных связей по токам и напряжениям) одновременно регулируются (стабилизируются) не только параметры внешних токов и напряжений ОТИК и ЦК $_{A,B,C}$, но и внутренние параметры ОТИК: напряжения на $C_{Б1}$, $C_{Б2}$ и полное потокосцепление трансреактора L_1-L_2 .

Обратное преобразование электроэнергии (зарядка АБ от УЗППН) осуществляется аналогичным образом. Заметим, что полное потокосцепление трансреактора (L_1-L_2) является однонаправленным и не имеет реверса при переключениях направлений преобразования, что обеспечивает быстродействие и высокое качество переходных процессов в замкнутой системе управления и стабилизации.

Все силовые ключи ОТИК снабжены нерассеивающими демпферно-снабберными индуктивно-емкостными цепочками (ДСЦ), имеющими зарядно-разрядные двухдиодные стойки. Каждый из снабберных конденсаторов заряжается при выключении соответствующего ключа и полностью разряжается по цепи обмотки трансреактора или трансформатора через тот же ключ и через другой ключ, подключённый к той же обмотке. Указанные ДСЦ обеспечивают «мягкую» коммутацию ключей (при нулевых токах или напряжениях), предотвращая коммутационные перенапряжения и снижая коммутационные тепловые потери и помехоизлучения.

В заключение перечислим основные достоинства силовой схемы канала комбинированной СЭС (рис. 3):

— совмещение функций: а) выпрямления трёхфазного напряжения магнитоэлектрического генератора с коррекцией коэффициента мощности, снижающей тепловые потери в его якорных обмотках и магнитопроводе; стабилизации выпрямленных дифференциальных напряжений и амплитуды переменного напряжения; б) питания цепи стартерного запуска силовой установки и электропривода, включая электротрансмиссию с мотор-колёсами шасси с рекуперативным торможением (синхронного или асинхронного) в широком скоростном диапазоне (вплоть до торможения); в) питания системы распределения трёхфазного напряжения 115/200 В, 400 Гц с пофазным регулированием (ста-

билизацией); г) обратной взаимосвязи системы распределения постоянного низкого напряжения (27 В) и звеньев постоянных повышенных напряжений (униполярного (270 или 540 В) и дифференциального (0 ± 135 В или 0 ± 270 В));

— гальваническая развязка между всеми внешними выводами, обеспечивающая повышенные надёжность и электробезопасность, а также согласование по напряжениям и токам низковольтных (сильноточных) и высоковольтных электронных ключей и вентиляей;

— высокий КПД преобразований за счёт совмещения трансформаторного и трансреакторного (прямо- и обратногоходового) преобразования и использования нерассеивающих демпферно-снабберных цепочек для «мягкой» коммутации;

— низкий уровень помехоизлучений и повышенная надёжность за счёт «мягкой» коммутации и ограничения коммутационных перенапряжений;

— многократное взаиморезервирование цепей питания, включая функцию источника бесперебойного питания (ИБП);

— отсутствие цепей для сквозных сверхтоков при несанкционированных включениях ключей из-за воздействия на блок управления электромагнитных импульсов молний и относительно малая внутренняя реактивная мощность, т.е. повышенная надёжность;

— высокая удельная мощность (на единицу массы и объёма) и требуемое качество электроэнергии в статических и динамических режимах.

Выводы

Предложенная структура комбинированного электроэнергетического комплекса с модульно-масштабируемой архитектурой вторичных источников электропитания для систем электроснабжения полностью электрифицированных самолётов, обеспечивающая параллельное включение магистральных каналов для повышения качества электроэнергии, предусматривает многократное взаиморезервирование цепей питания жизненно важных потребителей и позволяет унифицировать составляющие её МИП.

Описанные нетрадиционные схемотехнические решения для МИП обеспечивают требуемое качество электроэнергии в статических и динамических режимах, высокую удельную мощность (на единицу массы и объёма) и повышенную функциональную надёжность. Решения защищены приоритетом РФ и предусматривают высокую степень импортозамещения в номенклатуре изделий силовой электроники.

Библиографический список

1. Левин А.В., Мусин С.М., Харитонов С.А., Ковалев К.Л., Герасин А.А., Халютин С.П. Электрический самолет: концепция и технологии / Под ред. С.М. Мусина. — Уфа: УГАТУ, 2014. — 388 с.
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. — 160 с.
3. ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. — М.: Стандартинформ, 2011. — 34 с.
4. Резников С.Б., Бочаров В.В., Коняхин С.Ф., Парфенов Е.В. Бездуговая коммутационная аппаратура для перспективных транспортных систем электроснабжения с повышенным постоянным напряжением // Силовая электроника. 2011. Т. 3. № 31. С. 76-78.
5. Резников С.Б., Бочаров В.В., Харченко И.А., Лавринович А.В. Унифицированно-модульный синтез силовых интегральных схем многофункциональных импульсных преобразователей для авиационно-космических комбинированных систем электроснабжения переменного-постоянного тока. Часть 1. Унифицированные базовые модули обратимых импульсных конвертеров с промежуточным индуктивным накопителем // Практическая силовая электроника. 2014. № 4(56). С. 17-26.
6. Резников С.Б., Харченко И.А., Лавринович А.В. Унифицированно-модульный синтез силовых интегральных схем многофункциональных импульсных преобразователей для авиационно-космических комбинированных систем электроснабжения переменного-постоянного тока. Часть 2. Унифицированные базовые модули обратимых выпрямительно-инверторных преобразователей с корректором коэффициента мощности и накопительно-демодуляторными реакторами // Практическая силовая электроника. 2015. № 1(57). С. 46-55.
7. Резников С.Б., Харченко И.А., Лавринович А.В. Унифицированно-модульный синтез силовых интегральных схем многофункциональных импульсных преобразователей для авиационно-космических комбинированных систем электроснабжения переменного-постоянного тока. Часть 3. Унифицированные базовые модули конверторно-инверторных многофункциональных импульсных преобразователей с регулируемыми инверторами синусоидальных токов и напряжений // Практическая силовая электроника. 2015. № 3(59). С. 35-42.
8. Резников С.Б., Харченко И.А., Лавринович А.В. Унифицированно-модульный синтез силовых интегральных схем многофункциональных импульсных преобразователей для авиационно-космических комбинированных систем электроснабжения переменного-постоянного тока. Часть 4. Модульная архитектура многофункциональных импульсных преобразователей частоты и регуляторов параметров переменного-постоянного напряжения // Практическая силовая электроника. 2016. № 1(61). С. 39-46.
9. Резников С.Б., Харченко И.А., Аверин С.В., Лавринович А.В. Унифицированные импульсные преобразователи для авиационно-бортовых электроэнергетических комплексов // Вестник Московского авиационного института. 2015. № 4. С. 129-141.
10. Резников С.Б., Бочаров В.В., Харченко И.А., Лавринович А.В. Силовые интегральные схемы многофункциональных импульсных преобразователей для авиационно-космических бортовых электроэнергетических комплексов и систем // Практическая силовая электроника. 2014. № 1(53). С. 6-11.
11. 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.

COMBINED ELECTRIC POWER COMPLEX MODULAR AND SCALABLE ARCHITECTURE FOR ALL-ELECTRIC AIRCRAFT ELECTRIC POWER SYSTEMS

Reznikov S.B.^{1*}, Kiselev M.A.^{2**}, Moroshkin Ya.V.^{2***},
Mukhin A.A.^{2****}, Kharchenko I.A.^{3*****}

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

² State Institute of Aviation Systems,
7, Viktorenko str., Moscow, 125319, Russia

³ Central Research and Development Testing Institute of the Engineering Troops
of the Ministry of Defense of the Russian Federation,
Nakhabino-2, Moscow region, 143432, Russia

* e-mail: rezn41@mail.ru

** e-mail: makiselev@2100.gosnias.ru

*** e-mail: yvmoroshkin@2100.gosnias.ru

**** e-mail: aamuhin@2100.gosnias.ru

***** e-mail: igor8p5@yandex.ru

Abstract

The all-electric (more electric) aircraft (MEA, POA, MOET) concept is currently the main trend in the development of the perspective aircraft power system both in the Russian Federation and abroad. This concept assumes the replacement of aircraft pneumatic and hydraulic actuators by electric (or electro-hydraulic) ones, as well as transmission generators' constant speed drives elimination.

The total rated capacity of MEA aircraft electric power supply system can reach up to 1,5 MW. To ensure the specified quality of the electric energy at the consumers' inputs and mutual backup, its distributing channels should be connected in parallel. Thus, each channel should contain a higher voltage (270 V or 540 V) DC link in addition to the low voltage (27 V) central distribution unit with battery. These higher voltages are not used for feeding the distribution unit buses due to the complexity of arcless commutation provision. Thus, each MEA electric power supply channel is an independent combined AC-DC complex with four types of the central and peripheral distributing units: 115/200 V, 360... 800 Hz; 115/200 V, 400 Hz; ± 27 V and ± 270 (540) V. Electronic secondary power supplies interconnect these units with each other.

The authors suggest the structure of combined electric power complex with secondary power supplies' modular and scalable architecture for all-electric aircraft power supply systems with increased power-to-weight ratio based on unified multipurpose switched mode converters. This structure ensures parallel operation of both supply channels to improve electric energy quality. It reckons multiple mutual redundancy of the circuits

for essential consumers feeding, and allows unify multifunctional switched mode converters, constituting it.

The considered above nonconventional MPC circuit solutions provide the required electric power quality in static and dynamic modes, high specific power (per unit mass and volume) and increased functional reliability. These solutions are protected by Russian Federation priority and provide high extent of import substitution in listed products of power electronics.

Keywords: power electronics, multipurpose switched mode converters, all-electric aircraft, reversible rectifier-inverter converter, bidirectional inverter-rectifier converter, reversible switched mode converter, bidirectional frequency converter.

References

1. Levin A.V., Musin S.M., Kharitonov S.A., Kovalev K.L., Gerasin A.A., Khalyutin S.P. *Elektricheskii samolet: kontseptsiya i tekhnologii* (Electrical plane: concepts and technologies), Ufa, UGATU, 2014, 388 p.
2. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kharchenko I.A. *Elektromagnitnaya i elektroenergeticheskaya sovmestimost' sistem elektrosnabzheniya i vtorichnykh istochnikov pitaniya polnost'yu elektrifitsirovannykh samoletov* (Electromagnetic and electric power compatibility of power supply systems and secondary power sources of all-electric aircraft), Moscow, MAI, 2014, 160 p.
3. *Sistemy elektrosnabzheniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii. GOST R 54073-2010* (Power supply systems of airplanes and helicopters. General requirements and standards of power quality. State Standard R 54073-2010), Moscow, Standartinform, 2011, 34 p.

4. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Konyakhin S.F., Parfenov E.V. *Silovaya elektronika*, 2011, no. 3, pp. 4-6.
5. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kharchenko I.A., Lavrinovich A.V. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2014, no. 4 (56), pp. 17-26.
6. Reznikov S.B., Kharchenko I.A., Lavrinovich A.V. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2015, no. 1 (57), pp. 46-55.
7. Reznikov S.B., Kharchenko I.A., Lavrinovich A.V. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2015, no. 3 (59), pp. 35-42.
8. Reznikov S.B., Kharchenko I.A., Lavrinovich A.V. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2016, no. 1 (61), pp. 39-46.
9. Reznikov S.B., Kharchenko I.A., Averin S.V., Lavrinovich A.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, no. 4, pp. 129-141.
10. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kharchenko I.A., Lavrinovich A.V. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2014, no. 1 (53), pp. 6-11.
11. Reznikov S.B., Klimova S.R., Kharchenko I.A., Smirnov V.N., Savost'yanov V.V. *Silovaya elektronika*, 2016, no. 2, pp. 64-68.