

УДК 621.314.58

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ЗВЕНОМ ПОСТОЯННОГО ПОВЫШЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И МОДУЛЬНО-МАСШТАБИРУЕМОЙ АРХИТЕКТУРОЙ ДЛЯ 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.gosnias.ru*

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

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

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

Предложена комбинированная система электроснабжения с распределённым дифференциальным звеном постоянного повышенного напряжения и модульно-масштабируемой архитектурой для полностью электрифицированных самолётов (ПЭС). Рассмотрены схмотехнические и алгоритмические решения для унифицированных трёх основных типов модулей многофункциональных импульсных преобразователей, которые охватывают весь спектр необходимых электроэнергетических преобразований в авиаторбовых системах электроснабжения (СЭС). Рассмотренные решения позволяют реализовать СЭС с модульно-масштабируемой архитектурой для ПЭС с учётом импортозамещения в номенклатуре изделий силовой электроники. Приведен пример упрощенной структуры комбинированной СЭС (КСЭС) с распределённым дифференциальным звеном постоянного повышенного напряжения гипотетического ПЭС с четырьмя маршевыми авиадвигателями и четырьмя магистральными стартер-генераторами.

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

Введение

Перспективная концепция полностью электрифицированного самолёта (ПЭС), не содержащего пневмо- и гидроприводов для управления полётом и стабилизации частоты вращения магистральных стартер-генераторов (Ст-Г), предполагает существенное повышение электроэнерговооружённости (суммарной установочной мощности Ст-Г, включая ВСУ — вспомогательную силовую установку) до 1,5 МВт и выше. При этом для обеспечения высоких показателей надёжности (в частности «живучести») и качества питающей электроэнергии должны быть предусмотрены параллельное включение магистральных каналов электропитания авиабортовой системы электроснабжения (СЭС), количество которых соответствует числу Ст-Г (включая ВСУ), а также обратимая (двунаправленная) взаимосвязь с резервными низковольтными аккумуляторными (и/или суперконденсаторными — «ионисторными») батареями — АБ, с рабочим напряжением 27 В [1, 2, 9—11].

С учетом ограничительных требований по надёжности, электробезопасности и др., оптимальные уровни напряжений в основных распределительных подсистемах (сетях) авиабортовых СЭС для различных типов самолётов и вертолётов по критерию минимума «полётной» («стартовой») массы электрооборудования лежат в диапазоне от 100 до 300 В. В связи с этим отечественными и зарубежными нормирующими стандартами на качество электроэнергии в СЭС самолётов и вертолётов [12] предусмотрены следующие виды и уровни питающих напряжений: 1) постоянное повышенное напряжение (ППН): ± 270 В или ± 540 В с заземлённым на корпус минусом или с отдельным минусовым токопроводом; 2) постоянное низкое напряжение (ПНН): ± 27 В с заземлённым на корпус минусом; 3) трёх-и/или однофазное переменное напряжение со стабильными параметрами частоты и амплитуды (действующего значения): 400 Гц, 115/200 В; 4) трёхфазное переменное напряжение с нестабильной (плавающей) частотой, но стабильной амплитудой (действующим значением): 360...800 Гц, 115/200 В.

В многочисленных публикациях авторов этой работы [3—6, 13, 14], основанных на совместных с предприятиями авиационной промышленности исследованиях, предлагается для реализации концепции ПЭС вместо рекомендуемой в ГОСТ подсистемы распределения ППН: ± 270 (540) В — униполярной, с заземлённым на корпус минусом использовать так называемое дифференциальное звено (ДЗ) ППН: 0 ± 135 (0 ± 270) В с заземлённым на

корпус среднепотенциальным («нулевым») выводом [2—6].

Предлагаемое ДЗППН, помимо общеизвестных достоинств подсистемы распределения ППН, а именно:

- простота и надёжность обеспечения параллельного включения магистральных каналов электропитания;

- повышенные удельные массоэнергетические характеристики (по сравнению с подсистемой распределения ПНН+27 В);

- высокое качество электроэнергии в стационарных и переходных режимах;

- малое число последовательных преобразовательных каскадов на пути от первичного источника до потребителей с различными уровнями и видами напряжений;

- относительная простота реализации обратимого (двунаправленного) преобразования в резервно-аккумуляторных источниках бесперебойного питания (ИБП),

имеет также специфические преимущества:

- замедление процесса старения изоляции кабелей и проводов, повышенная электробезопасность за счёт вдвое сниженного потенциала относительно корпуса;

- удобство непосредственного использования (без трансформаторного звена высокой частоты) для питания полумостовых инверторных преобразователей, в частности — трёхфазных с заземлённой нейтралью;

- упрощение штатной и аварийной бездуговой коммутации постоянного тока с учётом необходимости утилизации (адиабатного поглощения) энергии предвключённых индуктивностей, суммируемой с энергией источника электропитания, выделенной им за время спада тока, а также с учётом ограничения (в ГОСТ) допустимого коммутационного импульса перенапряжения в бортовых сетях (600 В).

Указанные специфические преимущества позволяют обосновать частные технические требования к разрабатываемым СЭС для отечественных ПЭС, незначительно отличающиеся от нормируемых в ГОСТ заземлением среднепотенциального (нулевого) вывода вместо минусового.

В качестве магистральных электромашинных стартер-генераторов (Ст-Г) в составе перспективных СЭС ПЭС, по единодушному мнению отечественных и зарубежных экспертов [15—20], наиболее целесообразно использовать так называемые синхронные магнитоэлектрические генераторы (МЭГ) с вращающимися постоянными магнитами,

встроенные непосредственно в силовые установки (СУ) без вспомогательных редукторов и собственных подшипников (с увеличенным втрое воздушным зазором: $\delta \approx 1,2$ мм вместо 0,4 мм). Очевидный выигрыш в массогабаритных, энергетических и надёжных показателях и простота реализации стартерного режима (в качестве синхронного двигателя) для указанных МЭГ сопровождаются двумя их недостатками:

— необходимостью введения в механизм привода аварийного расцепителя валов (АР), например срезаемой или самоутапливаемой шпонки с практической нереализуемостью автоматического восстановления после прекращения режима перегрузки или короткого замыкания в якорной цепи;

— необходимостью применения силового электронного преобразователя для стабилизации амплитуды (действующего значения) выходного трёхфазного напряжения (например, с параметрами: 360...800 Гц, 115/200...250/440 В) с целью приведения его в соответствие с нормируемым в ГОСТ: 360...800 Гц, 115/200 В.

Авторам удалось относительно простыми средствами обеспечить указанную стабилизацию амплитуды напряжения (см. ниже) и тем самым нивелировать второй из приведённых недостатков МЭГ в качестве Ст-Г.

В современной авиабортовой силовой электронике наибольшие производственная, монтажная и эксплуатационно-ремонтная технологичности могут быть достигнуты только за счёт модульно-масштабируемой архитектуры автономных электроэнергетических комплексов (АЭЭК) с возможностью гибкого наращивания установочной мощности, многократного взаиморезервирования питающих цепей и быстрой замены (или отключения) неисправных узлов (модулей) без простоя транспорта. При этом существенно снижаются расходы на проектирование и разработку подобных узлов с требуемыми мощностями.

Из возможных схемотехнических решений для модулей вторичных источников электропитания (ВИЭП) на базе импульсных преобразователей с общеизвестными функциями: выпрямителей, конвертеров, инверторов, регуляторов (стабилизаторов) напряжений и токов и преобразователей частоты наиболее универсальными и пригодными для модульно-масштабируемой архитектуры АЭЭК являются так называемые многофункциональные импульсные преобразователи (МИП), обладающие по меньшей мере обратимостью (двунаправленностью) преобразования. К указанным МИП можно отнести следующие:

- ОВИП-ККМ-СН — обратимый выпрямительно-инверторный преобразователь с коррекцией коэффициента мощности и стабилизацией напряжений (выпрямленного, в частности — дифференциальных и питающего, включая с нестабильными параметрами частоты и амплитуды);

- ДИВП-РИСТ/Н — двунаправленный инверторно-выпрямительный преобразователь с регулируемым инвертором синусоидального тока/напряжения (непосредственный или с промежуточным звеном высокой частоты и циклоконвертором);

- ОИК (ОНИК или ОТИК) — обратимые (непосредственный и трансформаторный) импульсные конвертеры (понижающие, повышающие, полярноповторяющие и полярно-инвертирующие, а также с трансформаторным промежуточным звеном высокой частоты (ЗВЧ) или трансреакторные: прямо- и обратноточные);

- ДИПЧ — двунаправленные преобразователи частоты (непосредственные или с промежуточным звеном постоянного напряжения (униполярным или дифференциальным));

- ИР/СН — импульсные регуляторы/стабилизаторы напряжения (постоянного, переменного или универсальные),

а также другие МИП с большим набором функций [3—5].

Комбинированный канал электропитания с промежуточным дифференциальным звеном постоянного повышенного напряжения (ДЗППН) и резервно-аккумуляторным источником бесперебойного питания (Р/А ИБП) для комбинированных СЭС с модульно-масштабируемой архитектурой

Силовая схема указанного комбинированного однофазного канала на базе унифицированных модулей МИП представлена на рис. 1. Используются следующие обозначения: СУ — силовая установка (в том числе и вспомогательная — ВСУ); АР — аварийный расцепитель; МЭМ (Ст-Г) — магнитоэлектрическая машина (стартер-генератор); АЗС — автомат защиты сети (трёхфазный); ОИСН_В-ККМ — обратимый импульсный стабилизатор переменного напряжения — выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности; ОВИП-ККМ-СН — обратимый выпрямительно-инверторный преобразователь с коррекцией коэффициента мощности и стабилизацией напряжений; ДЗППН ($0 \pm U_d$) — дифференциальное звено постоянного повышенного напряжения; ДИВП-ИСН — двунаправленный инверторно-выпрямительный преобразователь с инвертором синусоидального напряжения (по схеме аналогичен ОВИП-ККМ-СН);

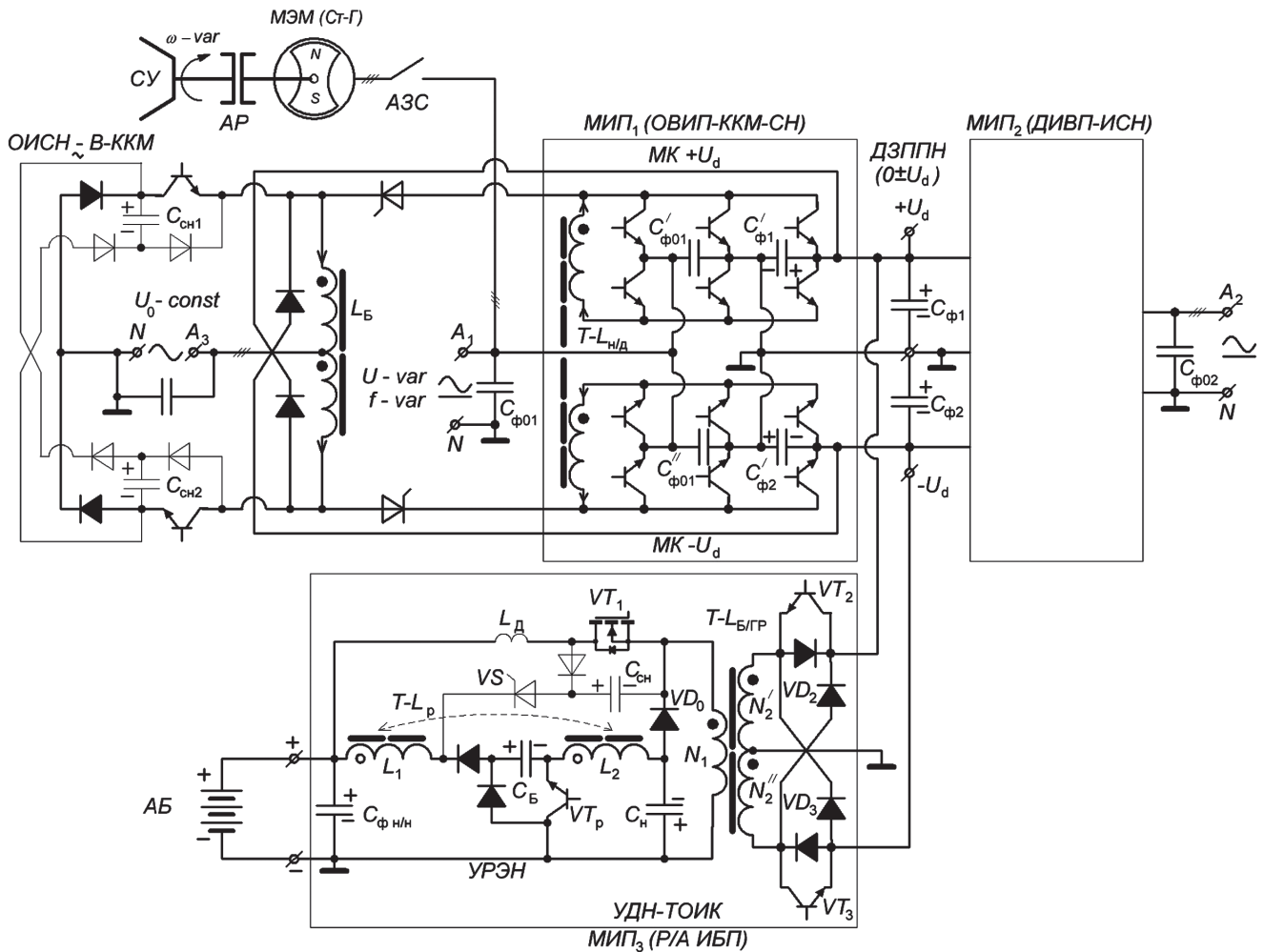


Рис. 1. Силовая схема комбинированного однофазного канала электропитания с промежуточным ДЗППН и Р/А ИБП для комбинированной СЭС с модульно-масштабируемой архитектурой

Р/А ИБП — резервно-аккумуляторный источник бесперебойного питания; $МК \pm U_d$ — мостовые коммутаторы с дифференциальными выпрямленными напряжениями $\pm U_d$; УДН-ОТИК — уравниватель делитель напряжений с обратимым трансформаторным импульсным конвертором; УРЭН — узел рекуперации энергии накопителя; АБ — аккумуляторная (или/и суперконденсаторная) батарея.

Схема комбинированного канала работает следующим образом. Трёхфазное напряжение от МЭМ (Ст-Г) через АЗС подаётся на распределительные шины (A_1-N) переменного напряжения с нестабильными параметрами частоты и амплитуды ($U-var, f-var$, например: 360...800 Гц, 115/200...250/440 В) — так называемые «шины грязного напряжения» для использования мощными нагрузками, некритичными к качеству питающей электроэнергии (нагревательно-противообледенительной системой и т.п.). С указанных шин напряжение также поступает на выводы переменного тока МИП₁

(ОВИП-ККМ-СН) на базе двухобмоточного накопительно-демодуляторного трансреактора ($T-L_{н/д}$) и двух мостовых коммутаторов ($МК \pm U_d$).

Выводы постоянных напряжений МИП₁ и МИП₂, образующих вместе двухкаскадный двунаправленный импульсный преобразователь частоты (ДИПЧ), подключены к двухконденсаторной фильтровой стойке ($C_{ф1,2}$) ДЗППН ($0 \pm U_d$), где $U_d = 135$ или 270 В (в зависимости от типа летательного аппарата). Выводы переменного напряжения МИП₂ подключены к централизованным распределительным шинам (A_2-N) переменного напряжения со стабильными параметрами частоты и амплитуды (например, 115/200 В, 400 Гц). В общем случае на указанных выводах можно формировать не только переменные, но и постоянные напряжения с регулируемыми уровнями (например, для МИП, питающих регулируемые электроприводы постоянного или переменного тока с режимом рекуперативного торможения).

МИП₃ (Р/А ИБП) осуществляет резервное (га-рантированное и бесперебойное) питание ДЗППН от аккумуляторной батареи (АБ), подключённой к распределительным шинам постоянного низкого напряжения — ШПНН (например, ± 27 В), а также зарядку этой батареи через гальванически-развязывающий балластный трансреактор (Т- $L_{Б/ГР}$).

Работа каждого из МК МИП₁ в режиме прямого преобразования (от выводов A_1-N к выводам ± U_d) сводится к выпрямлению переменного напряжения (U_{A1-N}) со стабилизацией выпрямленных потенциалов (± U_d) и коррекцией коэффициента потребляемой мощности за счёт широтно-импульсного формирования входного синусоидального тока, синхронного и синфазного с питающим синусоидальным напряжением (U_{A1-N}), приложенным к входным фильтровым конденсаторам ($C_{\phi 01}$, $C'_{\phi 01}$ и $C''_{\phi 01}$). При каждом очередном включении одной из диагональных пар транзисторных ключей левого четырёхплечевого моста каждого из МК полное потокосцепление (Ψ) трансреактора (Т- $L_{н/д}$) нарастает вместе с током в его соответствующей обмотке (в направлении, указанном на рис. 1), а после выключения этой пары и включения диагональной пары ключей правого четырёхплечевого моста указанное потокосцепление частично (или полностью) спадает вместе с током зарядки соответствующего конденсатора выходной фильтровой стойки $C_{\phi 1-2}$ и соответствующего конденсатора $C'_{\phi 1}$ или $C'_{\phi 2}$.

В режиме обратного преобразования (от выводов ± U_d к выводам A_1-N , например в режиме стартерного запуска СУ от ДЗППН), работа МК сводится к режиму инвертора синусоидального напряжения или тока (в зависимости от требуемой жёсткости выходной вольт-амперной внешней характеристики). При каждом очередном включении диагональной пары транзисторных ключей правого четырёхплечевого моста МК полное потокосцепление трансреактора (Т- $L_{н/д}$) нарастает вместе с током в цепи разрядки фильтровых конденсаторов $C_{\phi 1}$ и $C'_{\phi 1}$ (или $C_{\phi 2}$ и $C'_{\phi 2}$) на соответствующую обмотку трансреактора. При последующем выключении этой диагональной пары ключей и одновременном включении соответствующей диагональной пары ключей левого четырёхплечевого моста указанное потокосцепление частично (или полностью) спадает вместе с током зарядки фильтровых конденсаторов $C_{\phi 01}$ и $C'_{\phi 01}$ (или $C_{\phi 01}$ и $C''_{\phi 01}$) с полярностью, соответствующей полупериоду переменного напряжения U_{A1-N} .

В обоих описанных режимах прямого и обратного преобразования полное потокосцепление Ψ накопительно-демодуляторного трансреактора

(Т- $L_{н/д}$) благодаря широтно-импульсной модуляции с регулируемой относительной длительностью (коэффициентом заполнения) импульса: $\gamma = t_n / T_{\text{ШИМ}}$ формируется в соответствии с эталонным сигналом по модульно-синусному (пульсирующему) закону:

$\Psi(t) = \Psi_0 |\sin \omega t|$, определяющему соответствующий синусоидальный ток: $I(t) = I_0 \sin \omega t$ в цепи фильтрового конденсатора $C_{\phi 01}$.

При указанном ШИМ-регулировании для повышения устойчивости замкнутого контура управления и для одновременной стабилизации выпрямленных напряжений и амплитуды переменного тока между интервалами нарастания и спада полного потокосцепления: $d\Psi / dt > 0$ и $d\Psi / dt < 0$ вводится промежуточный интервал приблизительного сохранения потокосцепления ($d\Psi / dt \approx 0$) вместе с короткозамкнутым током в цепи заземления обоих выводов трансреактора через среднюю двухключевую стойку МК с длительностью токозамыкающей паузы: $\Delta t_n = \gamma_n T_{\text{ШИМ}}$, т.е. используется «дуальное управление» с помощью двух взаимонезависимых параметров γ и γ_n (по типу систем управления с инвариантным регулированием).

МИП₂ (ДИВП-ИСН), выполненный по аналогичной схеме, работает таким же образом, как и МИП₁.

Работа МИП₃ (Р/А ИБП) в режиме уравнительного делителя напряжений (УДН) с одновременной зарядкой аккумуляторной батареи сочетает функцию обратимого (двунаправленного) импульсного «транспортёра заряда» для конденсаторов фильтровой стойки $C_{\phi 1-2}$ ДЗППН (иначе: обратимого полярно-инвертирующего одноклапчатого импульсного модулятора) и функцию одноклапчатого трансреакторного прямо- и обратного импульсного конвертера.

Допустим, что напряжение + U_d на фильтровом конденсаторе $C_{\phi 1}$ ДЗППН превысило абсолютную величину напряжения: - U_d на конденсаторе $C_{\phi 2}$. Тогда производится высокочастотная модуляция ключа VT_2 полууправляемого «косого моста» диодно-ключевого мостового коммутатора VD_2-VT_2 , VD_3-VT_3 . При очередном включении ключа VT_2 полное потокосцепление балластного трансреактора с гальванической развязкой (Т- $L_{Б/ГР}$) нарастает вместе с токами в цепях: $C_{\phi 1}-VT_2-N'_2-C_{\phi 1}$; $N''_2-C_{\phi 2}$ - (обратный диод VT_3)- N''_2 («прямоходовая» зарядка $C_{\phi 2}$) и N_1 - (обратный диод VT_1)- $L_D-C_{\phi н/н}$ - N_1 («прямоходовая» зарядка $C_{\phi н/н}$ и АБ). При последующем выключении ключа VT_2 указанное пото-

косцепление частично (или полностью) спадает вместе с токами в цепях: $N'_2-C_{\phi 2}-VD_3-N'_2$ (зарядка $C_{\phi 2}$) и $N_1-C_n-VD_{02}-VD_{01}-N_1$ («обратноходовая» зарядка накопительного конденсатора C_n). Попутно заметим, что при этом отсутствует «отсос» электромагнитной энергии трансреактора в $C_{\phi 1}$ через N''_2 и VD_2 , так как ЭДС обмотки N''_2 , равная напряжению $U'_{N2} = U_{C\phi 2}$, меньше $U_{C\phi 1}$.

Далее указанные процессы высокочастотно-периодически качественно повторяются вплоть до сравнения напряжений на $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ ДЗППН. При этом с помощью УРЭН на базе полярно-инвертирующего импульсного конвертора, образованного VT_p-VD_p и L_p и работающего в режиме высокочастотной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), производится перекачка энергии из накопительного конденсатора C_n в фильтровый конденсатор $C_{\phi n/n}$ и в АБ. При изменении соотношения между напряжениями $U_{C\phi 1}$ и $U_{C\phi 2}$ ДЗППН происходят аналогичные процессы, но при модуляции ключа VT_3 (вместо VT_2). Если требуется зарядка АБ при равенстве напряжений на $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$, то можно чередовать указанные процессы в произвольном порядке, но с меньшим КПД за счёт «отсоса» части электромагнитной энергии трансреактора через диоды VD_2 и VD_3 .

При работе МИП₃ в режиме резервно-аккумуляторного источника бесперебойного питания (Р/А ИБП) производится высокочастотная ШИМ низковольтного (сильноточного) полевого транзисторного ключа VT_1 (МОСФЕТ) с низкоомным сопротивлением канала, снабжённого снабберным конденсатором $C_{сн}$ для ограничения коммутационных перенапряжений и осуществления «мягкой» коммутации (в совокупности с демпферным дросселем L_d), т.е. включений при нулевых токах и выключений — при нулевых напряжениях. Полная разрядка $C_{сн}$ осуществляется через разрядный тиристор VS на первую секцию L_1 рекуператорного трансреактора ($T-L_p$) для дальнейшей рекуперации накопленной им энергии в фильтровый конденсатор $C_{\phi n/n}$ вместе с энергией накопительного конденсатора C_n . Благодаря отсутствию в цепи нарастания тока дополнительных полупроводниковых переходов (кроме канала VT_1) и «мягкой» коммутации ключа обеспечиваются высокий КПД преобразования и снижение помехоизлучений МИП₃, что является существенным достоинством его схемного решения.

При очередном включении ключа VT_1 полное потокоосцепление $T-L_{Б/ГР}$ нарастает вместе с токами в цепях: $C_{\phi n/n}-L_d-VT_1-N_1-C_{\phi n/n}$ и $N''_2-N'_2$ -(обратный диод VT_2)- $C_{\phi 1}-C_{\phi 2}$ -(обратный диод VT_3)- N''_2 (прямоходовая зарядка фильтровой стойки

$C_{\phi 1}-C_{\phi 2}$). Затем, после выключения ключа VT_1 , указанное потокоосцепление частично (или полностью) спадает вместе с токами в цепях: $N'_2-N''_2-VD_2-C_{\phi 1}-C_{\phi 2}-VD_3-N'_2$ (обратноходовая зарядка фильтровой стойки) и $N_1-C_n-VD_0-N_1$ (передача энергии индуктивности рассеяния обмотки N_1 накопительному конденсатору C_n для дальнейшей рекуперации её в фильтр $C_{\phi n/n}$).

УРЭН выполнен по модернизированной «топологии Кука» с однотактным полярно-инвертирующим конвертором и промежуточным буферным конденсатором C_b [7]. Модернизация заключается в использовании прямоходовой трансформации тока через рекуператорный трансреактор $T-L_p$: от секции L_2 к секции L_1 , для чего эти секции электромагнитно взаимосвязаны (как отмечено кружками для начал обмоток секций на рис. 1). Указанное включение секций L_1 и L_2 позволяет существенно повысить удельную мощность УРЭН и его КПД, а также снизить требования к выполнению $T-L_{Б/ГР}$ с малыми индуктивностями рассеяния обмоток (с максимальным коэффициентом связи, труднореализуемым при значительном коэффициенте трансформации).

Рассмотренная схема однофазного канала электропитания с ДЗППН и Р/А ИБП может быть рекомендована в качестве взаимосвязанной группы унифицированных модулей многофункциональных импульсных преобразователей (МИП_{1,2,3}), пригодных для синтеза комбинированных СЭС с модульно-масштабируемой архитектурой и повышенной электроэнерговооружённостью, в частности для СЭС ПЭС.

Пример комбинированной СЭС для гипотетического ПЭС

На рис. 2 приведена упрощенная структура комбинированной СЭС (КСЭС) с распределённым дифференциальным звеном постоянного повышенного напряжения (ДЗППН 0 ± 270 В или 0 ± 135 В) гипотетического ПЭС с четырьмя (или двумя — по типу ПЭС Боинг-787) маршевыми авиадвигателями (силовыми установками — СУ) и четырьмя магистральными стартер-генераторами (Ст-Г) на базе МЭГ встроенной конструкции.

В структуре КСЭС гипотетического ПЭС использованы МИП₁ (ОВИП-ККМ-СН) для питания распределительных шин: $\Pi_{ДЗППН}$, $\Pi_{U-\text{const}, f-\text{var}}$ и $\Pi_{U-\text{var}, f-\text{var}}$, расположенных между центральным отсеком и соответствующими СУ, включая ВСУ в хвостовом отсеке, а также МИП₂ (ДИВП-ИСН) для питания центральных распределительных шин: ЦШ 115/200 В левого и правого бортов (центрального, носового и хвостового отсеков). Структура

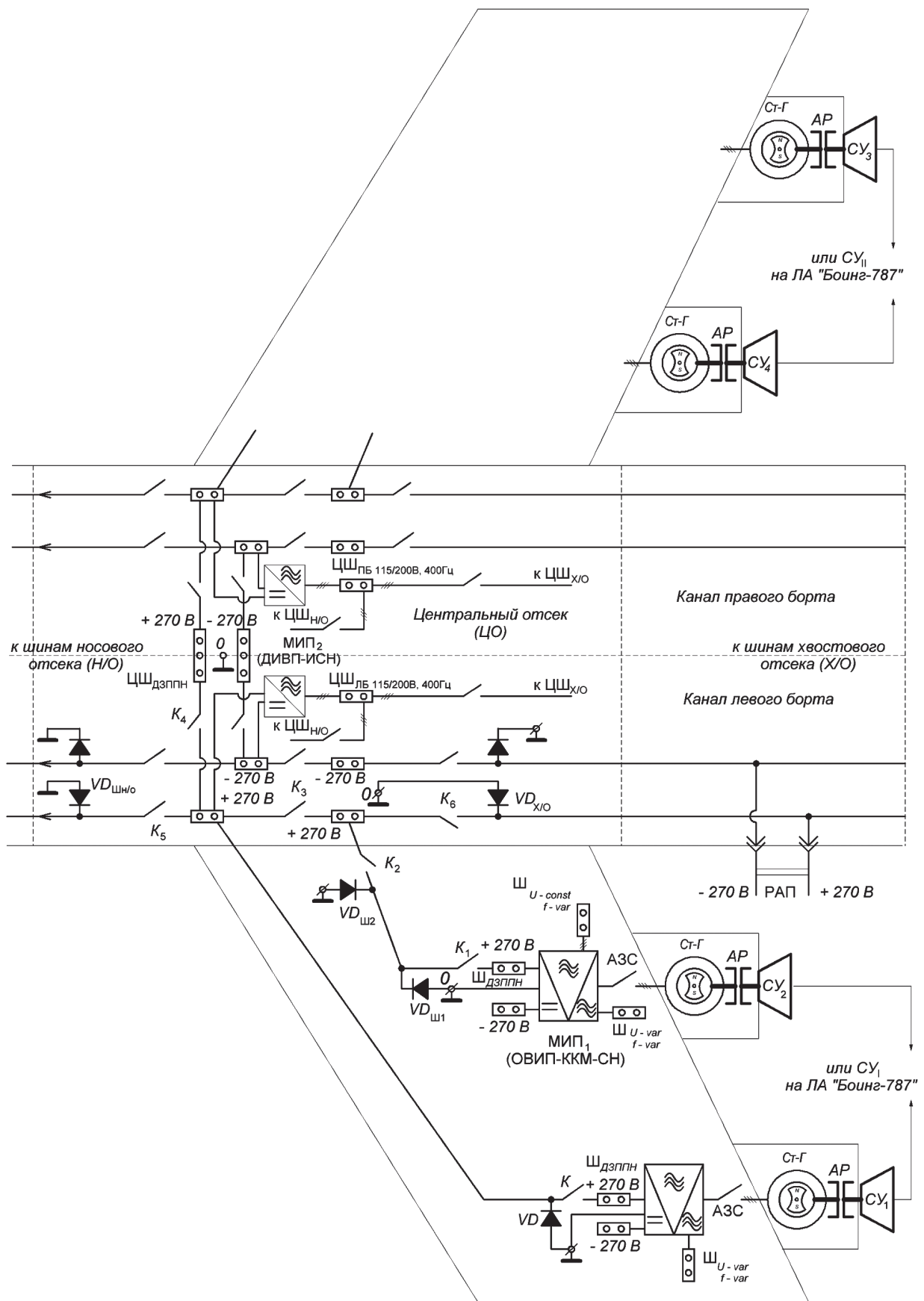


Рис. 2. Упрощенная структура КЭС с распределенным ДЗППН (0 ± 270 В или 0 ± 135 В) гипотетического ПЭС

также содержит МИП₃ (Р/А ИБП) вблизи аккумуляторных (и/или суперконденсаторных — «ионисторных») батарей (на рис. 2 не показаны) и розетку (разъём) аэродромного питания (РАП) вблизи центрального отсека для питания ДЗППН (0 ± 270 В или 0 ± 135 В).

Все шины распределённого ДЗППН коммутируются с помощью электромеханических контакторов постоянного напряжения 270 В без специальных мощных дугогасительных камер, снабжённых обратными шунтирующими диодами ($VD_{ш}$) для автоматического самошунтирования «послевключённых» индуктивностей (индуктивных нагрузочных контуров). При этом предполагается, что указанные контакторы не используются для размыкания токов «предвключённых» индуктивностей, для этого служат полупроводниковые ключи, входящие в состав МИП, или/и специальные полупроводниковые аппараты защиты и коммутации (п/п АЗК) с разгрузочными резистивными и/или полупроводниковыми элементами с возможностью адиабатного поглощения энергии «предвключённых» индуктивностей в сумме с энергией источника питания, выделенной им за время спада размыкаемого тока.

Выводы

Предложенная комбинированная система электроснабжения с распределённым дифференциальным звеном постоянного повышенного напряжения и модульно-масштабируемой архитектурой для полностью электрифицированных самолётов обладает высокими производственной, монтажной и эксплуатационно-ремонтной технологичностью, массоэнергетическими и надёжностными характеристиками и показателями электромагнитной совместимости. Разработанные схемотехнические и алгоритмические решения для унифицированных трёх основных типов модулей многофункциональных импульсных преобразователей охватывают весь спектр необходимых электроэнергетических преобразований в авиабортовых системах электроснабжения (СЭС), защищены приоритетом РФ и позволяют реализовать СЭС с модульно-масштабируемой архитектурой для ПЭС с учётом импортозамещения в номенклатуре изделий силовой электроники.

Библиографический список

1. Лёвин А.В., Мусин С.М., Харитонов С.А., Ковалёв К.Л., Герасин А.А., Халютин С.П. Электрический самолёт: концепция и технологии. — 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 самолётов / Под ред. С.Б. Резникова. — М.: Изд-во МАИ, 2014. — 160 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Резников С.Б., Бочаров В.В., Коляхин С.Ф., Парфенов Е.В. Бездуговая коммутационная аппаратура для перспективных транспортных систем электроснабжения с повышенным постоянным напряжением. // Силовая электроника. 2011. № 3. С. 76-78.
7. Кук С., Ненахов С. Новый DC/DC-преобразователь с нулевыми пульсациями и интегрированными магнитопроводами // Силовая электроника. Часть 1 — 2004. №2. С. 62-64 и Часть 2 — 2005. №1. С. 77-79.
8. Электрооборудование летательных аппаратов: Учебник для вузов. В 2-х т. / Под ред. С.А. Грузкова. Т. 1. — М.: Изд-во МЭИ, 2005. — 568 с. Т. 2. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 552 с.
9. Лёвин А.В., Алексеев И.И. Полностью электрифицированный самолёт — от концепции к реализации // Авиационная промышленность. 2006. № 2. С. 24-31.
10. Лёвин А.В., Алексеев И.И., Лифшиц Э.Я. Стартер-генераторная система со встроенным в авиадвигатель электромагнитным агрегатом для полностью электрифицированного самолёта // Авиационная промышленность. 2007. № 1. С. 50-52.
11. Карасев Д.А., Арутюнов А.Г., Загордан А.А. К вопросу создания магистральных транспортных самолётов с электрическими силовыми установками // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т.22. № 1. С. 132-139.
12. ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолётов и вертолётов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. — М.: Стандартинформ, 2011. — 34 с.
13. Резников С.Б., Бочаров В.В., Кириллов В.Ю., Постников В.А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость транспортного электрооборудования с высоковольтными цепями питания / Под

- ред. С.Б. Резникова. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. — 512 с.
14. Бочаров В.В., Постников В.А., Резников С.Б., Харченко И.А. Энергоэкономические комбинированные системы электроснабжения с высоким качеством электроэнергии для концепции «полностью электрифицированного самолета» // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=33058>
 15. Орешикина А. Более-менее электрический: на пороге новый тип самолетов // Инвест-Форсайт. 2017. URL: <https://www.if24.ru/bolee-menee-elektricheskij-samolet/>
 16. Воронович С., Каргопольцев В., Кутахов В. Полностью электрический самолет: Современное состояние и перспективы развития // Авиапанорама. 2009. № 2(74). URL: <http://aviapanorama.ru/wp-content/uploads/2009/04/14.pdf>
 17. Резников С.Б., Сыроежкин Е.В., Харченко И.А. Комбинированные системы электроснабжения на базе обратимых электромашинных и статических преобразователей для полностью электрифицированных самолетов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С. 143-154.
 18. Тулинова Е.Е., Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Ларионов А.Е. Обзор разработок полностью электрических самолетов // Электричество. 2016. № 4. С. 15-25.
 19. В России создается полностью электрический самолет. URL: <http://путь.рф/news/125/>
 20. Контев А.Н. Авиационное и радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации: Учеб. пособие в 3-х книгах. — Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва, 2011. Кн. 1. — 244 с.

ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM WITH DISTRIBUTED DIFFERENTIAL HIGH VOLTAGE DC-LINK AND MODULAR-SCALABLE ARCHITECTURE FOR ALL-ELECTRIC AIRCRAFT

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.gosniias.ru

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

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

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

Abstract

The promising concept of all-electric aircraft free from pneumo- and hydro actuators for flight control and stabilizing rotation frequency of main starter-generators supposes significant rise of power supply capacity up to 1.5 MW and more. To ensure high reliability indices and quality of supplied electric energy, the parallel connection of supply channels of onboard electric power system should be provided, as well as reversible (bidirectional) interconnection with stand-by low-voltage batteries.

To realize the concept of all-electric aircraft, the article suggests application of the so-called differential

higher voltage DC-link with frame grounded averaged-potential (“zero”) wire.

Apart from the well-known benefits of the high DC voltage distribution subsystems, suggested high voltage DC-link has specific benefits, which allow substantiate particular requirements to the power supply systems for domestic all-electric aircraft.

As an example, the article presents the power circuit of the electric power supply combined channel with high voltage DC-link and standby battery based uninterruptible source for combined electric power systems with modular-scalable architecture. It also describes this channel’s operation. The reviewed

structure of a single-phase power supply channel with high voltage DC-link may be recommended as an interrelated group of unified modules of switched mode converters applicable for synthesis of combined power supply systems with modular-scalable architecture and enhanced power supply capacity, and for all-electric aircraft power supply systems in particular.

The article suggest also the combined power supply system with distributed higher voltage DC-link and modular-scalable architecture for all-electric aircraft. Schematic and algorithmic solutions for three types of multifunctional switched mode converters, encompassing all specter of necessary conversions in onboard systems are considered. These solutions allow realize power supply systems with modular-scalable architecture for all-electric aircraft with account for import substitution of power electronics' product range. The article presents the example of a simplified combined power supply system with differential higher voltage DC-link of hypothetical all-electric aircraft with four cruise engines and four main starter-generators.

Keywords: power electronics, multipurpose switched mode converters, all-electric aircraft, differential high voltage DC link, reversible rectifier-inverter transducer, 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* (Electric aircraft: concept and technology), 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. Reznikov S.B., Kharchenko I.A., Averin S.V., Lavrinovich A.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, no. 4, pp. 129-141.
4. Reznikov S.B., Kharchenko I.A., Lavrinovich A.V. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2016, no. 1(61), pp. 39-46.
5. Reznikov S.B., Klimova S.R., Kharchenko I.A., Smirnov V.N., Savost'yanov V.V. *Silovaya elektronika*, 2016, no. 2, pp. 64-68.
6. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Konyakhin S.F., Parfenov E.V. *Silovaya elektronika*, 2011, no. 3, pp. 76-78.
7. Kuk S., Nenakhov S. *Silovaya elektronika*. Part 1, 2004, no. 2, pp. 62-64 and Part 2, 2005, no. 1, pp. 77-79.
8. Gruzkov S.A. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov* (Electric flying machines), Moscow, MEI. Vol. 1, 2005 - 568 p. Vol. 2, 2008 - 552 p.
9. Levin A.V., Alekseev I.I. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2006, no. 2, pp. 24-31.
10. Levin A.V., Alekseev I.I., Lifshits E.Ya. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2007, no. 1, pp. 50-52.
11. Karasev D.A., Arutyunov A.G., Zagordan A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 1, pp. 132-139.
12. *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 norms of quality of electric energy. State Standard R 54073-2010), Moscow, Standartinform, 2011, 34 p.
13. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kirillov V.Yu., Postnikov V.A. *Elektroenergeticheskaya i elektromagnitnaya sovmestimost' transportnogo elektrooborudovaniya s vysokovol'tnymi tsepyami pitaniya* (Electric power and electromagnetic compatibility of transport facilities with high-voltage power circuits), Moscow, MAI-PRINT, 2010, 512 p.
14. Bocharov V.V., Postnikov V.A., Reznikov S.B., Kharchenko I.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 58, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=33058&eng=Y>
15. Oreshkina A. *Invest-Forsait*, 2017, available at: <https://www.if24.ru/boleee-menee-elektricheskij-samolet/>
16. Voronovich S., Kargopol'tsev V., Kutakhov V. *Aviapanorama*, 2009, no. (74), available at: <http://aviapanorama.su/wp-content/uploads/2009/04/14.pdf>
17. Reznikov S.B., Syroezhkin E.V., Kharchenko I.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 143-154.
18. Tulinova E.E., Kovalev K.L., Ivanov N.S., Larionov A.E. *Elektrichestvo*, 2016, no. 4, pp. 15-25.
19. *V Rossii sozdaetsya polnost'yu elektricheskii samolet*, <http://путь.рф/news/125/>
20. Koptev A.N. *Aviatsionnoe i radioelektronnoe oborudovanie vozdushnykh sudov grazhdanskoi aviatsii* (Aircraft and radio electronic equipment of civil aviation aircraft), Samara, Samarskii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet im. S.P. Koroleva, 2011. Book 1 - 244 p.