

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.314.58

### КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ОБРАТИМЫХ ЭЛЕКТРОМАШИНЫХ И СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛНОСТЬЮ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ САМОЛЕТОВ

Резников С.Б.<sup>1\*</sup>, Сыроежкин Е.В.<sup>1\*\*</sup>, Харченко И.А.<sup>2\*\*\*</sup>

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

<sup>2</sup> 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: evgsyr@mail.ru

\*\*\* e-mail: ihar@mail333.com

---

Рассмотрены структуры комбинированных систем электроснабжения переменного-постоянного тока на базе обратимых электромашинных (стартер-генераторных и двигатель-компенсаторных) и статических (выпрямительно-инверторных и разночастотных) преобразователей, удовлетворяющих основным критериям, предъявляемым к электротехническому оборудованию перспективных полностью электрифицированных самолетов. Предлагаемые высокоэффективные схемотехнические решения для каналов питания и преобразователей защищены приоритетом Российской Федерации.

*Ключевые слова:* комбинированная система электроснабжения, обратимый электромашинный преобразователь, обратимый статический преобразователь, вращающийся управляемый выпрямитель, магнитоэлектрическая машина, трёхфазный обратимый выпрямительно-инверторный преобразователь, обратимый трансформаторный импульсный конвертор.

---

#### Введение

Реализация концепции так называемого полностью электрифицированного самолёта (без внутрибортовых пневмо- и гидроприводов) предполагает существенное повышение мощности бортовых магистральных электрогенераторов (до 500 кВт на одну силовую установку с двумя встроенными высокооборотными генераторами) [1–5].

До настоящего времени в качестве магистральных генераторов (в том числе стартер-генераторов) мощностью от 30 до 250 кВт традиционно используются каскадные синхронные генераторы с бесконтактным роторным электромагнитным возбуждением от синхронного электромашинного возбуждателя через вращающийся неуправляемый вып-

рямитель [1, 2]. К их существенным недостаткам относятся:

— низкая надёжность и большая инерционность системы роторного возбуждения, в частности неспособность быстрого развозбуждения при аварийных коротких замыканиях (КЗ) и релейных сбросах нагрузки из-за большой постоянной времени цепи обмотки возбуждения;

— конструктивные сложности в обеспечении высокооборотности и малого воздушного зазора при явнополюсном исполнении ротора;

— относительно малый пусковой момент в стартерном (асинхронном) режиме из-за отсутствия ЭДС синхронного возбудителя и сниженной эффективности демпферного контура («беличьей клетки») при профилированном воздушном зазоре (при явнополюсном роторе).

В связи с этим в последнее десятилетие предпринимаются попытки замены синхронного возбудителя вращающимся трансформатором с питанием его стартерной обмотки через инвертор повышенной частоты от источника постоянного (например, выпрямленного) напряжения. В качестве вращающегося трансформатора можно использовать бесконтактную асинхронную машину с фазным ротором. Однако при повышенной частоте питающего напряжения (более 400...800 Гц) такая машина будет иметь относительно большие тепловые потери в стали.

Замена каскадного генератора без привода постоянной частоты вращения (ППЧВ) на магнитоэлектрический генератор (МЭГ) с вращающимися постоянными магнитами (обычно — редкоземельными) сопряжена с необходимостью:

— использования на приводном валу мощного аварийного быстродействующего расцепителя для защиты от КЗ в якорной обмотке;

— существенного переразмеривания конструкции из-за усиления изоляции обмотки при относительно высокой кратности частот вращения и якорной ЭДС (более 2...2,5);

— установки полноразмерного (по мощности) статического регулятора напряжения в якорной (или выпрямительно-выходной) цепи (с соответствующими мощными тепловыми потерями и помехоизлучениями).

### **Выбор альтернативного типа электромашинных стартер-генераторов без ППЧВ**

Благодаря развитию импульсной силовой электроники в области элементной базы и схемотехники, а также систем цифрового управления мощны-

ми статическими преобразователями появилась альтернатива для выбора типа электромашинных стартер-генераторов без ППЧВ, а именно — асинхронный стартер-генератор (АСт-Г) с самовозбуждением в генераторном режиме в диапазоне малых скольжений по якорной цепи через высокоэффективный транзисторный регулируемый инвертор синусоидального напряжения (РИСН). Указанную альтернативу не следует путать с предпринимавшимися ранее попытками замены синхронных генераторов с ППЧВ на асинхронные генераторы (в частности, асинхронизированно-синхронные машины двойного питания) стабильной частоты (например, 50 или 400 Гц), работающие в широком диапазоне частот вращения, а следовательно, и скольжений (в работах Бертинова, Ботвинника, Радина, Шакаряна и многих других). В нашем случае речь идёт о применении АСт-Г в подсистеме нестабильной частоты (360...800 Гц). При этом мощность возбуждения по цепи якоря (при малых скольжениях — до 5...7 %) относительно мала.

Нельзя не учитывать и следующие благоприятные для обоснования такой альтернативы факторы:

1) неоспоримые достоинства классической асинхронной машины (АМ) с роторным контуром типа «беличьей клетки» — надёжность, технологичность, высокооборотность, малый воздушный зазор, широкий выбор средств охлаждения, термостойкость, хорошие массогабаритные показатели и пусковые характеристики [8];

2) хорошая электроэнергетическая совместимость комбинированной системы электропитания переменного-постоянного повышенного напряжения с питающей цепью РИСН, имеющей постоянное повышенное напряжение  $0 \pm 270$  В и заземлённый среднепотенциальный токопровод;

3) для разгрузки РИСН в генераторном режиме АМ для её самовозбуждения можно применить синхронный компенсатор (СК — перевозбуждённый синхронный двигатель) с постоянными магнитами или имеющий конструкцию вышеуказанного каскадного синхронного генератора с асинхронным запуском или с запускающим (разгонным) приводом от той же силовой установки через расцепляемую (например, обгонную) муфту;

4) асинхронные генераторы с возбуждением от РИСН и СК позволяют обеспечить надёжную параллельную работу двух и более каналов питания с переменным напряжением (при существенном ограничении различий в частотах вращения силовых установок, а следовательно, в скольжениях генераторов и мощностях возбуждения); при этом мож-

но применить один общий для всей энергосистемы синхронный компенсатор, запускаемый от вала вспомогательной силовой установки (ВСУ).

Последний из перечисленных факторов имеет существенные ограничения. Поэтому в комбинированных системах электроснабжения переменного тока без ППЧВ вне зависимости от типа магистральных генераторов параллельная работа каналов питания обычно предполагается только для каналов с постоянным (выпрямленным) повышенным напряжением (270 или 540 В). При таком объединении локальных подсистем в единую централизованную систему питания (СППН 270 или 540 В) с большой суммарной установленной мощностью (до 1 МВт) обеспечивается высокое качество электроэнергии в статических и динамических (переходных) режимах.

Подсистемы СППН (270 или 540 В) в виде локальных каналов уже достаточно широко применяются на зарубежных самолётах с высокой электроэнерговооружённостью, в частности на самолётах Боинг-787, А-380, БЛА Барракуда, бомбардировщике В-1 и др., и регламентированы также отечественным ГОСТом [12].

Однако до настоящего времени объединение указанных локальных каналов ППН в единую централизованную СППН остаётся пока практически нереализуемым из-за громоздкости и низкой надёжности мощных электромеханических контакторов и аварийных быстродействующих выключателей с дугогасительными камерами или заменяющих их полупроводниковых, а также комбинированных электронно-электромеханических аппаратов защиты и коммутации (АЗК). В [6, 9, 10] предприняты попытки создания приемлемых комбинированных АЗК для СППН, но работы в предложенном направлении нельзя считать завершёнными.

Исходя из вышеизложенного представляется рациональным параллельно с решением проблем эффективной (бездуговой) коммутации в СППН попытаться реализовать компромиссную (на сегодняшний день) комбинированную систему электроснабжения переменного-постоянного повышенного напряжения (КСЭС  $\equiv$  ПН) с отдельными магистральными каналами подсистемы генерирования и распределения повышенных напряжений трёх видов, зафиксированных в ГОСТ Р 54073-2010 [12]: 1) переменного трехфазного напряжения нестабильной («плавающей») частоты: 115/200 В или 230/400 В, 360...800 Гц; 2) постоянного повышенного напряжения  $\pm 270$  В или  $\pm 540$  В; 3) переменного трехфазного напряжения стабильной частоты: 115/200 В или 230/400 В, 400 Гц. В указанных

КСЭС  $\equiv$  ПН с целью повышения энерго- и топливной экономичности основные мощные бортовые нагрузки предполагается распределить по шинам питания с перечисленными напряжениями таким образом, чтобы минимизировать суммарные тепловые потери в последовательных преобразовательных каскадах от магистрального генератора до потребителей.

Что касается отдельной классической резервной подсистемы питания постоянного низкого напряжения ( $\pm 27$  В) с аккумуляторными батареями, регламентируемой ГОСТами для обеспечения питанием низковольтных потребителей и резервных электромашинных и конверторно-инверторных преобразователей, то её наличие, естественно, предусматривается при любых вариантах структуры СЭС.

При разработке современных и перспективных высокоэффективных по массогабаритным, надёжным (в частности по ремонтпригодности), стоимостным и эксплуатационно-экономическим показателям (с учётом минимизации простоев транспорта) авиационно-бортовых электронных и электротехнических комплексов предпочтение отдается унифицировано-модульной масштабируемой (по мощности) архитектуре [11]. При этом наибольшая эффективность достигается при выборе схемотехнических решений для построения модулей с обратимым (двунаправленным) преобразованием, например понижающее-повышающих обратимых импульсных конверторов (непосредственных или трансформаторных (ОНИК или ОТИК — 270/27 В)), обратимых выпрямительно-инверторных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности (ОВИП-ККМ 115/200 В —  $0 \pm 270$  В), обратимых преобразователей частоты (ОПЧ 360...800 Гц/400 Гц) и др., а также многофункциональных импульсных преобразователей (МИП). Указанные предпочтения обеспечивают гибкую преемственность при модернизации отдельных узлов, устройств, комплексов и подсистем, что является важнейшим фактором в развитии авиационной электроэнергетики и электроники.

В связи с вышеизложенным представляется актуальной разработка некоторых рациональных схемотехнических решений для построения подсистем генерирования и распределения с унифицированно-модульной архитектурой КСЭС  $\equiv$  ПН для ПЭС.

#### **Пример комбинированной СЭС с повышенным уровнем электрификации**

Существующие комбинированные СЭС повышенной мощности предусматривают исключение

гидро- и пневмоприводов постоянной частоты вращения (ППЧВ) для встроенных в авиадвигатель магистральных генераторов переменного тока, а следовательно, использование в качестве первичной системы генерирования отдельных (по числу силовых установок (СУ), а иногда — удвоенному числу) генераторов, центральные распределительные устройства (ЦРУ) трехфазного напряжения (115/200 В или 230/400 В) нестабильной («плавающей») частоты (*f-var*, 360...800 Гц), зафиксированного в зарубежных и отечественных ГОСТах (например, ГОСТ Р 54073-2010 [12]).

С целью обеспечения параллельной работы магистральных каналов электропитания для повышения надежности (в частности, аварийной «живучести») и качества электроэнергии, помимо первичной системы генерирования и распределения, как правило, используют три вторичные системы распределения: а) ± 270 В; б) ~115/200 В или 230/400 В, 400 Гц; в) ± 27 В [1, 3, 4].

В качестве одного из вариантов такой СЭС на рис. 1 приведена комбинированная структура системы электроснабжения самолета типа Боинг-787 на базе шести стартер-генераторов Ст-Г — по два в каждой СУ (включая ВСУ) с бесконтактным (каскадным) электромагнитным возбуждением от электромашинного синхронного возбудителя через вращающийся выпрямитель (типа отечественных бесконтактных генераторов ГТ), выпрямительных (трансформаторно-выпрямительных) устройств (ВУ, ТВУ) и преобразователей частоты (ПЧ) — непосредственных (циклоконверторных) или со звеном постоянного тока [2]. Канал распределения выпрямленного повышенного напряжения (+ 270 В) коммутируется несколькими электромеханическими контакторами с дугогасительными камерами.

Применяемый (обычно — каскадный) бесконтактный синхронный Ст-Г с электромагнитным возбуждением по сравнению с Ст-Г, возбуждаемым редкоземельными постоянными магнитами (магни-

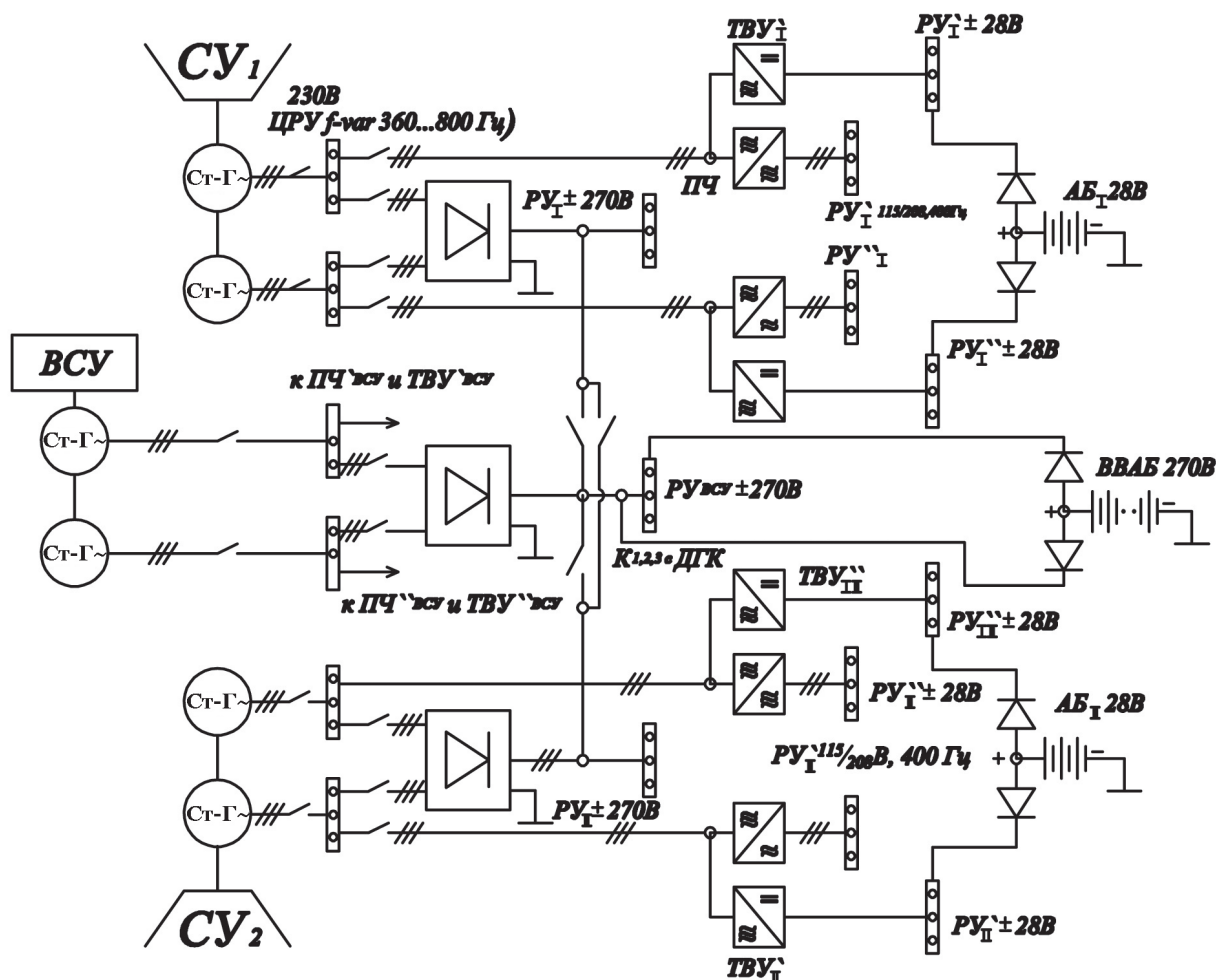


Рис. 1. Комбинированная структура системы электроснабжения самолёта БОИНГ-787 с первичной системой генерирования 3-фазного переменного напряжения 230 В, *f-var*, 360...800Гц и тремя подсистемами распределения переменного-постоянного тока: 1) ± 270 В; 2) ~115/200 В или 230/400 В, 400 Гц; 3) ± 27 В

тоэлектрической машиной — МЭМ), имеет неоспоримые преимущества, а именно:

- позволяет регулировать и стабилизировать напряжение;
- обеспечивает развозбуждение при коротком замыкании в якорной цепи (хотя и не быстродействующее из-за большой постоянной времени цепи возбуждения);
- дает возможность использования его в качестве асинхронного двигателя (стартера) или асинхронного генератора (при неявнополюсном роторе с демпферными контурами), а также синхронного двигателя или компенсатора;
- не содержит редкоземельных материалов (самарий-кобальта).

В то же время МЭМ имеет неоспоримое преимущество по сравнению с обычным каскадным Ст-Г и с АСт-Г: пригодность для встроенного в СУ исполнения, без редуктора и без собственных подшипников (с увеличенным втрое воздушным зазором 1,2 мм).

**Первый вариант предлагаемой структуры канала комбинированной СЭС переменного-постоянного напряжения (СЭС<sub>≐</sub>)**

В аспекте рассматриваемых комбинированных СЭС с первичной подсистемой распределения пе-

ременной частоты (360...800 Гц), но со стабильным действующим значением напряжения достаточно перспективной представляется СЭС на базе асинхронных генераторов с якорным самовозбуждением при малых скольжениях (3...7 %) от регулируемых инверторов синусоидального напряжения (РИСН), возможно разгруженных в установившихся режимах с помощью параллельно подключенных синхронных компенсаторов (перевозбужденных ненагруженных синхронных двигателей, например МЭМ), запараллеленных с простейшими инверторами прямоугольного тока (с характеристикой «источника тока»).

Структура канала указанной комбинированной СЭС<sub>≐</sub> для перспективных ЛА с полностью электрифицированным оборудованием (ПЭО) [6, 7] приведена на рис. 2, где использованы следующие обозначения узлов и агрегатов: СУ — силовая установка; АС-Г — асинхронный стартер-генератор; ЭМР — электромагнитный расцепитель; РУ — распределительное устройство; ВУ (ТВУ) — непосредственное и трансформаторное выпрямительные устройства; ККМ — корректор коэффициента мощности; ОИК — обратимый импульсный конвертор; ЗУ — зарядное устройство; АБ — аккумуляторная батарея; РАП — розетка аэродромного питания; СК — синхронный компенсатор; РИСН/Т — регули-

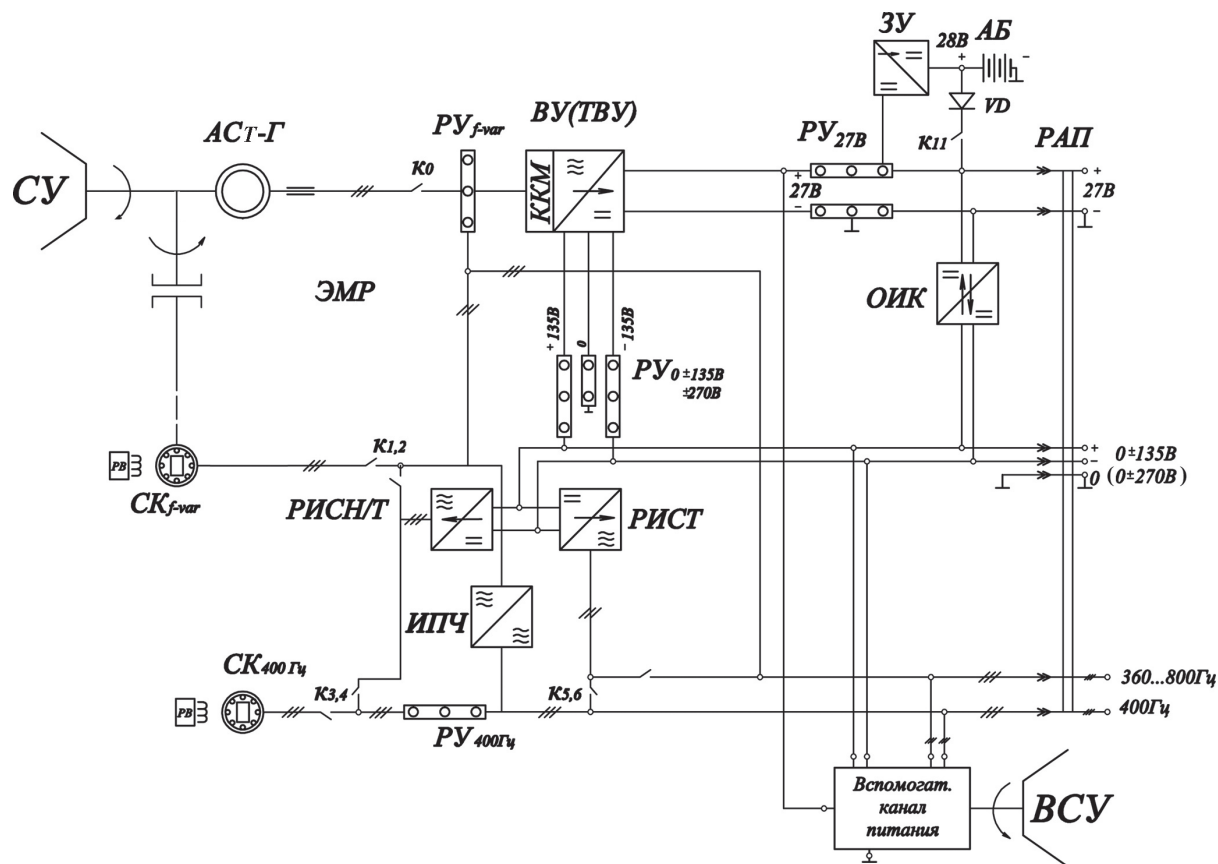


Рис. 2. Структура канала комбинированной СЭС переменного-постоянного тока для перспективных ЛА с ПЭО

руемый инвертор синусоидального напряжения/тока; ИПЧ — импульсный преобразователь частоты.

Характерным отличием распределительной подсистемы постоянного повышенного напряжения в этой СЭС от аналогичной вышерассмотренной (см. рис. 1) является наличие дополнительной заземленной шины с промежуточным (нулевым) потенциалом ( $PU 0 \pm 135$  В или  $0 \pm 270$  В), позволяющей при двухпроводном распределении расширить номенклатуру потребителей (с напряжениями 135 и 270 В или 270 и 540 В), не повышая при этом напряжение изоляции относительно корпуса (но замедляя процесс ее старения и повышая электробезопасность).

Асинхронный стартер-генератор (АСт-Г) по сравнению с каскадным синхронным (с электромагнитным возбуждением через вращающийся выпрямитель) имеет существенный выигрыш по надежности и по массогабаритным показателям благодаря простоте конструкции, меньшему воздушному зазору и возможности повышения частоты вращения, а также не вызывает бросков тока (при коротких замыканиях) и всплесков напряжения при сбросе нагрузки. Однако указанный выигрыш существенно снижается, если учесть добавление к генератору еще синхронного компенсатора ( $СК_{f-var}$ ) и инвертора напряжения или тока (РИСН/Т) [6, 7].

### Универсальная электрическая машина для подсистемы генерирования

Окончательный выбор того или иного варианта комбинированной СЭС требует проведения детального сравнительного анализа применительно к конкретному типу самолета и с учетом многих ограничительных факторов и многокритериальной оптимизации структур, схем и параметров узлов [11].

Тем не менее, для лучшей сопоставимости вариантов в качестве первого этапа оптимизации представляется целесообразной и актуальной задача разработки структуры и принципиальной схемы универсальной электрической машины (УЭМ), пригодной для использования в обоих вариантах СЭС (см. рис. 1 и 2) в качестве синхронного стартер-генератора и синхронного компенсатора (СК) с эффективным асинхронно-синхронным разгоном (а без нагрузки — даже при постоянной частоте питающего напряжения 400 Гц).

На рис. 3 приведена схема УЭМ с бесконтактным возбуждением от трансформаторно-синхронного возбудителя (Т/С В) через вращающийся управляемый выпрямитель (ВУВ) с кольцевым вращающимся импульсным трансформатором (КВИТ) в цепи управления тиристорами выпрямителя (с помощью импульсных «пачек»  $U_{имп}$ ).

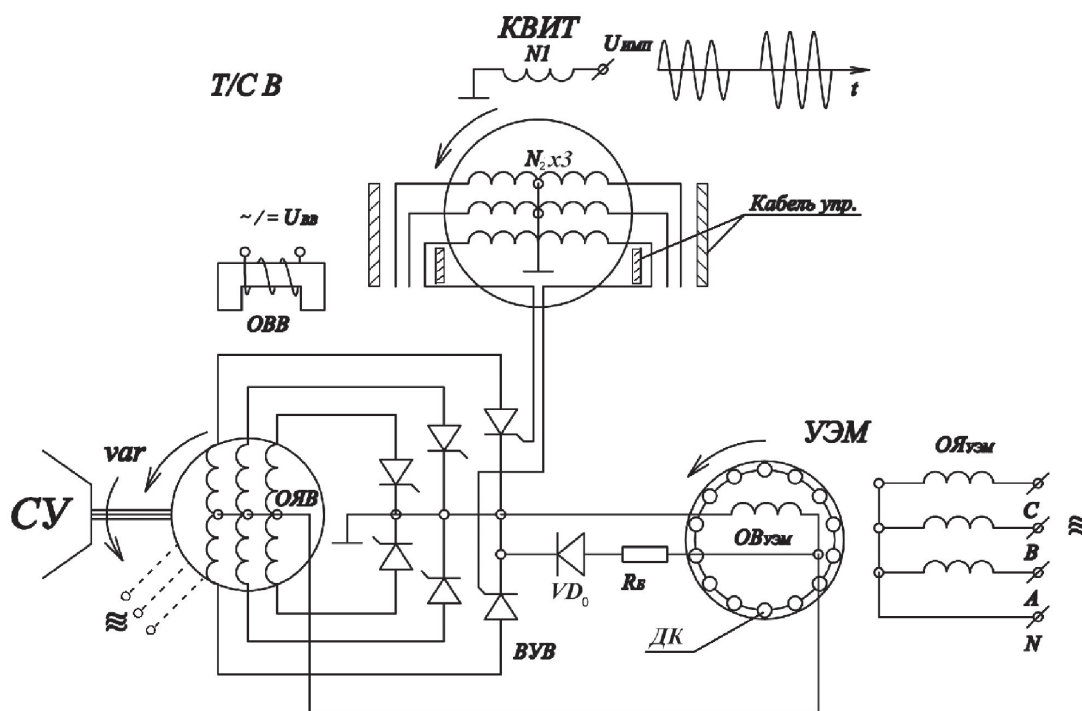


Рис. 3. Схема универсальной электрической машины — синхронно-асинхронного стартер-генератора и двигателя-компенсатора с бесконтактным возбуждением от трансформаторно-синхронного возбудителя через вращающийся управляемый выпрямитель с кольцевым вращающимся импульсным трансформатором в цепи импульсного управления ( $U_{имп}$ )

Для повышения частоты вращения (с целью снижения массы и габаритов), а также эффективности демпферных контуров (типа «беличьей клетки») ротор УЭМ лучше выполнять, как и статор, неявнополюсным. Для ускорения процесса развозбуждения при аварийном коротком замыкании в якорной цепи, а также улучшения динамики регулирования (в частности, стабилизации) выходного напряжения при циклических импульсных нагрузках обмотка возбуждения машины (ОВ<sub>УЭМ</sub>) зашунтирована цепью из последовательно соединенных обратного диода и термоударостойкого балластного резистора ( $R_6$ ).

Для обеспечения возбуждения заторможенной машины при её пуске возбудитель выполнен с обмоткой возбуждения на статоре (ОВВ), позволяющей использовать ее и в качестве первичной обмотки вращающегося силового трансформатора с повышенной частотой питающего напряжения ( $U_{1ВВ}$ ).

На рис. 4 показан упрощенный конструктивный эскиз кольцевого вращающегося импульсного трансформатора (КВИТ) с трехсекционной вторичной обмоткой 4 ( $N_2 \times 3$ ), охватывающей цилиндрический ленточный магнитопровод 5, выполненный из аморфного железа с увеличенной индукцией насыщения (по сравнению с ферритовым или альсиферовым), вибропрочным магнитопроводом статора, состоящим из втулки 1 и боковых шайб 2. Коаксиальный кабель управления, уложенный в продольном желобе 6 приводного вала УЭМ 7 и закрепленный в нем с помощью эпоксида, может быть многожильным (как показано на рис. 3) или

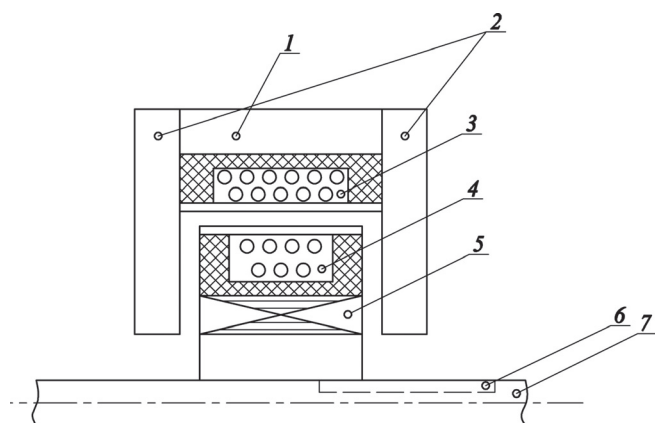


Рис. 4. Конструктивный эскиз кольцевого вращающегося импульсного трансформатора: 1 — ферритовая втулка; 2 — ферритовые шайбы; 3 — статорная первичная обмотка ( $N_1$ ); 4 — роторная вторичная обмотка ( $N_2 \times 3$ ); 5 — цилиндрический ленточный магнитопровод (аморфное железо); 6 — желоб для коаксиального кабеля управления (с эпоксидным закреплением); 7 — приводной вал ротора УЭМ

одножильным с резистивно-емкостным расщеплением со стороны тиристорных выводов управления.

Регулирование среднего значения тока ОВ<sub>УЭМ</sub> осуществляется с помощью низкочастотной модуляции, т.е. изменения низкой частоты следования высокочастотных «пачек» управляющих импульсов, а также регулирования напряжения возбуждения возбудителя ( $U_{имп}$  и  $U_{ВВ}$  на рис. 3).

Наряду с указанным двухканальным регулированием можно для возбуждения возбудителя применить постоянные магниты на статоре или комбинацию магнитоэлектрического и электромагнитного возбуждения возбудителя.

Из вышесказанного вытекают следующие преимущества УЭМ по сравнению с широко применяемым синхронным стартер-генератором с двухкаскадным бесконтактным возбуждением через диодный вращающийся выпрямитель:

- возможность экстренного развозбуждения при аварийном КЗ в якорной цепи;
- улучшение динамических характеристик регулирования (стабилизации) выходного напряжения;
- возможность возбуждения заторможенной машины (при пуске), а также при малой частоте вращения (в начальной стадии разгона);
- возможность использования в качестве полноценного асинхронного стартер-генератора (при неявнополюсном исполнении ротора с мощными демпферными контурами), причем с увеличенным (синхронно-асинхронным) пусковым и разгонным электромеханическим моментом в стартерном режиме.

Предложенная универсальная машина является многофункциональной (синхронно-асинхронным стартер-генератором и электродвигателем, а также синхронным компенсатором). Наряду со своим основным предназначением — для самолетных комбинированных систем электроснабжения (СЭС) переменного-постоянного тока с первичной подсистемой генерирования без приводов постоянной частоты вращения (ППЧВ) — универсальная машина с успехом может применяться и в других транспортных и стационарных СЭС.

#### Второй вариант предлагаемой структуры и схема типового канала генерирования и распределения

Структура и схема типового канала генерирования и распределения приведены на рис. 5. Канал соответствует одной силовой установке (СУ) и построен на базе асинхронного стартер-генератора (АСт-Г) с синхронно-асинхронным стартер-компенсатором (С/АСт-К) и цепью самовозбуждения

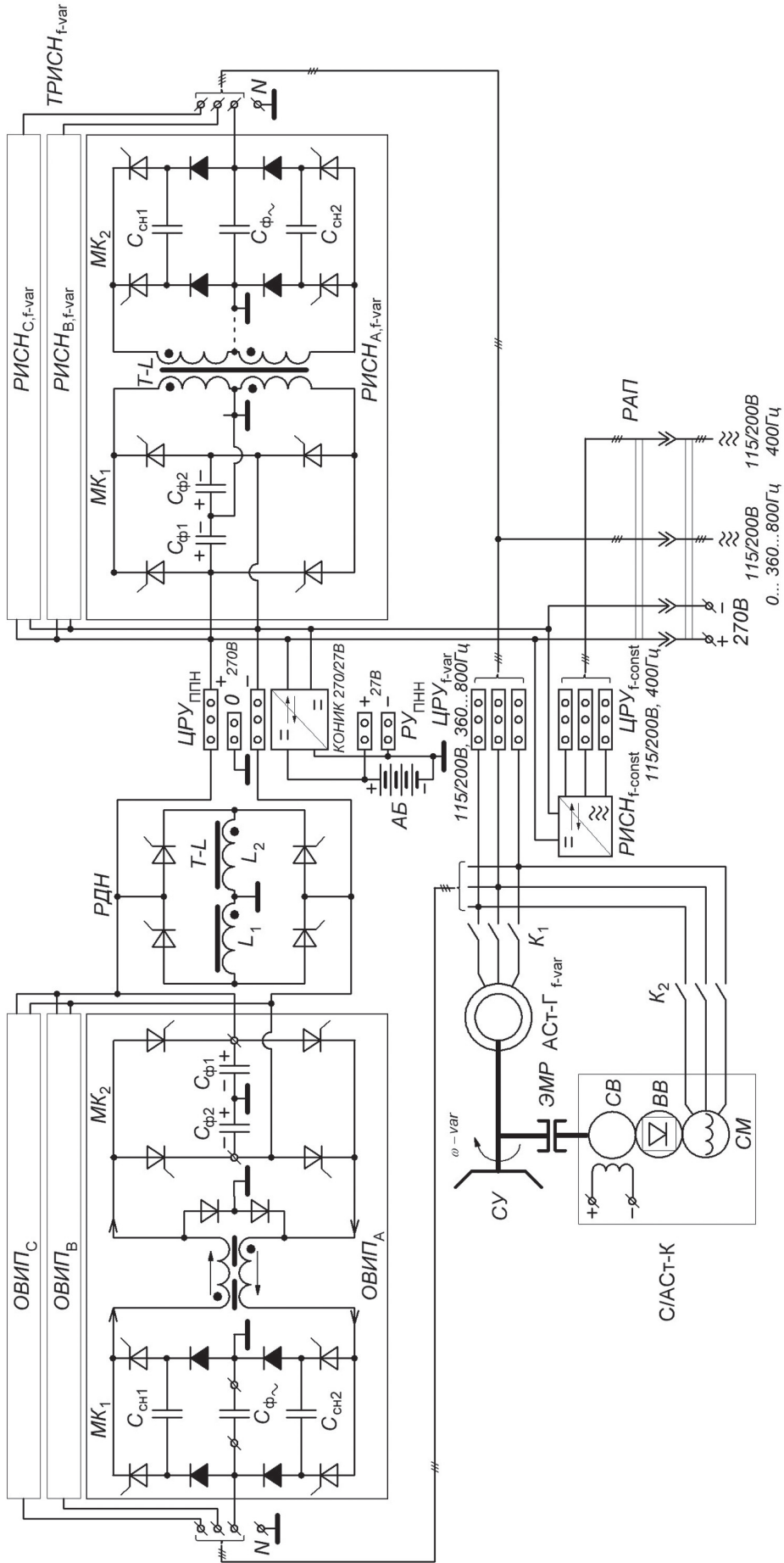


Рис. 5. Структура и схема типового канала генерирования и распределения с унифицировано-модульной архитектурой комбинированной СЭС<sub>≡</sub> на базе асинхронного стартер-генератора с синхронно-асинхронным стартер-компенсатором и системой самовозбуждения через преобразователь частоты со звеном постоянного повышенного напряжения (ППН 0 ± 270 В)



через преобразователь частоты со звеном постоянного повышенного напряжения ( $0 \pm 270$  В).

Обозначения, принятые на рис. 5:

СУ <sub>$\omega$ -var</sub> — силовая установка нестабильной частоты вращения;

АСт-Г<sub>f-var</sub> — асинхронный стартер-генератор;

С/АСт-К — синхронно-асинхронный стартер-компенсатор с каскадным возбуждением;

ЭМР — электромагнитный расцепитель;

ОВИП<sub>A,B,C</sub> — трёхфазный обратимый выпрямительно-инверторный преобразователь с коррекцией коэффициента мощности (ККМ);

РИСН<sub>A,B,C</sub> — трёхфазный регулируемый инвертор синусоидального напряжения (двунаправленный инверторно-выпрямительный преобразователь — ДИВП);

ЦРУ — центральное распределительное устройство (Ш — шина распределения);

РАП — розетка аэродромного питания;

РДН — регулируемый делитель напряжения (обратимый импульсный конвертор);

МК — мостовой коммутатор;

Т-L — накопительно-демодуляторный трансреактор;

ОТИК<sub>o/x</sub> — обратногоходовой обратимый трансформаторный импульсный конвертор.

Там же приведены схемы силовых частей каждого из фазных унифицированных модулей ОВИП и РИСН. Обе схемы имеют в своем составе импульсно-модуляторные корректоры коэффициента мощности в виде управляемых мостовых коммутаторов (МК) и демодуляторно-накопительные трансреакторы (Т-L). ОВИП выполнен на базе спаренного обратимого непосредственного импульсного конвертора (ОНИК), а РИСН — на базе обратногоходового обратимого трансформаторного (трансреакторного) импульсного конвертора (ОТИК<sub>o/x</sub>). Для упрощения изображения на схемах вместо высококачественных транзисторов (VT) изображены полностью управляемые (двухоперационные) вентили (тиристоры типа *GTO* и *IGCT*).

К достоинствам обеих схем относятся: обратимость (двунаправленность) преобразования энергии; широкий диапазон регулирования выходных параметров (с повышением и с понижением напряжения), высокое быстродействие переключений направлений преобразования благодаря непрерывности и однополярности (без реверса) пульсирующего полного потокосцепления трансреактора, а также высокая надежность благодаря исключению цепей для сквозных сверхтоков, наличию ограничительных (снабберных) конденсаторов и отсутствию электролитических конденсаторов.

Первая схема (ОВИП) обладает существенно более высоким КПД благодаря непрерывности внешних токов. Вторая схема (РИСН) имеет более низкий КПД из-за реактивных токов в контурах с индуктивностями рассеяния обмоток трансреактора и снабберными конденсаторами ( $C_{сн}$ ), обеспечивающими также защиту ключей от коммутационных перенапряжений, однако она может обеспечить гальваническую развязку и тем самым повысить надежность и электробезопасность подсистемы СЭС.

Обе схемы унифицированных модулей ОВИП (ОНИК) и РИСН (ОТИК) могут быть рекомендованы также в качестве индивидуальных (или групповых) коммутаторов (усилителей мощности) для бортовых управляющих и насосных электроприводов с рекуперативным торможением, а также двунаправленных регуляторов (стабилизаторов) переменных и постоянных напряжений (токов) для отдельных (или групповых) потребителей или для связи питающих каналов с различными параметрами напряжений (рис. 5).

Интерес также представляет схема унифицированного модуля регулируемого делителя напряжения (РДН) на базе ОНИК.

Он содержит мостовой коммутатор, емкостную фильтровую стойку ( $C_{1,2}$ ) и трансреактор со средним выводом ( $L_{1,2}$ ). К его существенным достоинствам относятся: высокая надежность благодаря отсутствию цепей для сквозных сверхтоков и отсутствию энергоемких электролитических конденсаторов с низкими показателями термостойкости, безотказности и долговечности и высокое быстродействие регулирования благодаря однонаправленности (отсутствию реверса) полного потокосцепления трансреактора.

Важнейшим достоинством схемы модуля РДН является её пригодность для синтеза многофазных РИСН с высоким качеством выходной электроэнергии, с общим нейтрально-нулевым выводом и без дополнительных индуктивно-емкостных низкочастотных фильтров переменного тока [11].

## Выводы

Рассмотренные варианты структур комбинированных систем электроснабжения переменного-постоянного тока на базе обратимых электромашинных (стартер-генераторных и двигатель-компенсаторных) и статических (выпрямительно-инверторных, инверторно-выпрямительных и разночастотных) преобразователей удовлетворяют основным критериям, предъявляемым к электротехническому оборудованию перспективных полностью электрифицированных самолетов. Предлагаемые схе-

технические решения для основных каналов питания и преобразователей представляются пригодными для реализации масштабируемой универсально-модульной архитектуры указанных систем с высокой массоэнергетической, надежностной и эксплуатационно-экономической эффективностью. Решения защищены приоритетом РФ.

### Библиографический список

1. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В 2 т. / Под ред. С.А. Грузкова. — Т. 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. — М.: Изд-во МЭИ, 2005. — 568 с. Т. 2. Элементы и системы электрооборудования — приемники электрической энергии. — М.: ИД МЭИ, 2008. — 552 с.
2. Шергин В.Г. Статический преобразователь электроэнергии на базе повышающего промежуточного звена: дис. ... канд. техн. наук. — М., 2011. — 203 с.
3. Лёвин А.В., Алексеев И.И. Полностью электрифицированный самолет — от концепции к реализации // *Авиационная промышленность*. 2006. № 2. С. 24-31.
4. Лёвин А.В., Алексеев И.И., Лифшиц Э.Я. Стартер-генераторная система со встроенным в авиадвигатель электромагнитным агрегатом для полностью электрифицированного самолета // *Авиационная промышленность*. 2007. № 1. С. 50-52.
5. Карасев Д.А., Арутюнов А.Г., Загордан А.А. К вопросу создания магистральных транспортных самолетов с электрическими силовыми установками // *Вестник Московского авиационного института*. 2015. Т. 22. № 1. С. 132-139.
6. Резников С.Б., Бочаров В.В., Кириллов В.Ю., Постников В.А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость транспортного электрооборудования с высоковольтными цепями питания / Под ред. д.т.н, проф. С.Б. Резникова. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. — 512 с.
7. 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://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=33058>
8. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины: Асинхронные машины / Под ред. И.П. Копылова. — М.: Высшая школа, 1988. — 328 с.
9. Машуков Е.В., Шевцов Д.А., Ульященко Г.М. Транзисторные аппараты защиты и коммутации для авиационных систем распределения энергии. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. — 188 с.
10. Резников С.Б., Бочаров В.В., Коняхин С.Ф., Соловьёв И.Н., Ермилов Ю.В. Комбинированный электронно-механический аппарат защиты и коммутации для систем распределения постоянного повышенного напряжения // *Практическая силовая электроника*. 2013. № 2(50). С. 39-42.
11. Коняхин С.Ф., Резников С.Б., Бочаров В.В., Сыроежкин Е.В., Харченко И.А. Критерии оптимальности и примеры синтеза структуры комбинированной системы электроснабжения переменного-постоянного тока для перспективных летательных аппаратов с полностью электрифицированным оборудованием // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2013. № 2. С. 2-10.
12. ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. — М.: Стандартинформ, 2011. — 34 с.

## COMBINED POWER-SUPPLY SYSTEMS BASED ON REVERSIBLE ROTARY AND STATIC CONVERTERS FOR “FULLY-ELECTRIFIED-AIRCRAFT”

Reznikov S.B.<sup>1\*</sup>, Syroezhkin E.V.<sup>1\*\*</sup>, Kharchenko I.A.<sup>2\*\*\*</sup>

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

<sup>2</sup> *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*

\* e-mail: rezn41@mail.ru

\*\* e-mail: evgsyr@mail.ru

\*\*\* e-mail: ihar@mail333.com

### Abstract

The realization of so-called “Fully-Electrified-Aircraft” concept (i. e. without any on-board air-powered and fluid drives) assumes a significant power

increase of on-board main electric generator (up to 500 kW per a single power installation with two build-in high-speed generators).

Up to date, cascaded-synchronous generators with brushless electromagnetic rotor excitation from synchronous cross-field exciter through uncontrolled rotating rectifier-exciter were traditionally used as the main electric generators (including starter-generators) with capacity range from 30 kW to 250 kW. Their essential drawbacks are as follows:

- low reliability and significant rotor excitation system time lag;
- structural complexity of salient-pole rotor design;
- relatively small starting torque in starter (asynchronous) mode;

The cascade generator without constant rotary speed driving gear replacement by magneto-electric generator (with rotary permanent magnets) leads to the following complications:

- The necessity of implementing fast powerful emergency releaser on the drive shaft to provide armature-coil short circuit protection;
- Significant structure oversize due to winding coil isolation strengthening with relatively high rotation speed to armature EMF ratio (more than 2-2.5);
- The necessity to install a full-size (with respect to power) armature circuit static voltage regulator.

Due to power pulse electronics as well as static power converters digital control systems development the electrical motor starter-generators without constant rotary speed driving gear alternative appeared, namely, asynchronous starter-generator with self-excitation in generating mode within small sliding range over armature circuit via high-performance transistor controlled sine-wave voltage inverter. With that, the excitation power in armature circuit (with insignificant sliding value up to 5-7%) is relatively small.

The following positive moments should be taken into account for such alternative justification:

1) undisputed advantages of a classic asynchronous motor with «squirrel cage» rotor circuit are as follows: reliability, workability, high rotation speed, small air gap, wide variety of cooling facilities, thermal stability, fair weight and size parameters and starting performance;

2) higher voltage combined AC-DC power supply system of displays decent electric energy compatibility with the voltage inverted supply circuit with higher DC voltage of  $0 + 270$  V and grounded mid-potential conductor;

3) synchronous compensator with permanent magnets can be used for self-excitation to unload the sine wave voltage inverter in AM-generating mode;

4) asynchronous generators with excitation from sine-wave voltage inverters together with synchronous equalizer, allow provide trouble-free parallel operation of two and even more AC power-supply channels.

The last of the above-listed factors has significant limitations. That is why combined AC-DC power supply systems without constant-rotary-speed-driving gear assume usually parallel operation only for the channels with DC (rectified) voltage (270 V or 540 V) irrespective of the types of main generators

With such local sub-systems integration into common centralized power-supply system (270...540 V) with high specified total power (up to 1 kW) provides high quality electric power both in static and dynamic (transitional) modes.

It seems a reasonable try to realize a trade-off (at least at the present time) combined system for AC-DC higher voltage power-supply system with separate main channels of higher power generating and distribution subsystems of three types fixed in the Russian State Standard "P 54073-2010":

1) three-phase unstable ("floating") frequency AC voltage: 115/200V or 230/400V, 360-800Hz; 2) higher DC voltage:  $\pm 270$ V or  $\pm 540$ V; 3) three-phase stable frequency AC voltage: 115/200V or 230/400V, 400 Hz.

As to separate classic backup low-voltage ( $\pm 27$  V) DC power-supply sub-system with rechargeable battery regulated by Russian State Standard for low-voltage power consumers as well as backup electric-motor and/or convertor-invertor transducers - its presence, surely, is provided with any power-supply system version.

While designing up-to-date high-performance on-board electronic and electrical system distinguished by their weight-dimension, reliability, value and operation-economical parameters the preference should be given to a unified modular power-scalable architecture. At that, the best effectiveness is obtained under corresponding circuit design selection for equipment modules with reversible (bidirectional) conversion, such as, buck/boost reversible switched mode converters (direct or transformer versions - 270/27 V); reversible rectifying-inverter converters with power factor correction (115/200 V -  $0 \pm 270$ V), reversible frequency converter (360...800 Hz/400Hz) and the others as well as multifunctional pulse converters. These preferences provide rather flexible adaptivity in various units, devices, assemblages and sub-systems upgrading.

AC-DC combined power-supply system structures based on reversible electric-machine (starter-generator and engine-compensatory) and static (rectifying-inverter, inverter-rectifying and various-frequency) converters examined in this article successfully meet basic criterion that is submitted to a promising Fully-Electrified-Aircraft electrical equipment. The suggested circuit design for the main power-supply channels and converters seems to be suitable for A/M scalable systems of versatile modular architecture with high mass-energy,

reliability and operation-economical effectiveness. It should be noted that such a circuit design is protected by Russian Federation priority.

**Keywords:** combined power-supply system, invertible convertible electric machine converter, convertible invertible static converter, revolving controlled rectifier, magneto-electric generator, three-phase reversible rectifying-inverter convertor, reversible transformer pulse converter.

## References

1. Gruzkov S.A. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov* (Electrical equipment of aircraft). Moscow, MEI, 2005, vol. 1 - 568 p., vol. 2 - 552 p.
2. Shergin V.G. *Sticheskie preobrazovatel' elektroenergii na baze povyshayushchego promezhutochnogo zvena* (Static power converter on the basis of up-intermediary), Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2011, 203 p.
3. Levin A.V., Alekseev I.I. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2006, no. 2, pp. 24-31.
4. Levin A.V., Alekseev I.I., Lifshits E.Ya. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2007, no. 1, pp. 50-52.
5. Karasev D.A., Arutyunov A.G., Zagordan A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 1, pp. 132-139.
6. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kirillov V.Yu., Postnikov V.A. *Elektroenergeticheskaya i elektromagnitnaya sovmestimost' transportnogo elektrooborudovaniya s vysokovol'nymi tsepyami pitaniya* (The electrical and electromagnetic compatibility of transport electric equipment high-voltage power supply circuits), Moscow, MAI-PRINT, 2010, 512 p.
7. Bocharov V.V., Postnikov V.A., Reznikov S.B., Kharchenko I.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 58, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=33058>
8. Radin V.I., Bruskin D.E., Zorohovich A.E. *Elektricheskie mashiny: Asinkhronnye mashiny* (Electric machines: Induction motors), Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 328 p.
9. Mashukov E.V., Shevtsov D.A., Ul'yashchenko G.M. *Tranzistornye apparaty zashchity i kommutatsii dlya aviatsionnykh sistem raspredeleniya energii* (Transistor protecting and switching devices for aircraft power distribution systems), Moscow, MAI-PRINT, 2009, 188 p.
10. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Konyakhin S.F., Solov'ev I.N., Ermilov Yu.V. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2013, no. 2(50), pp. 39-42.
11. Konyakhin S.F., Reznikov S.B., Bocharov V.V., Syroezhkin E.V., Kharchenko I.A. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2013, no. 2, pp. 2-10.
12. *Sistemy elektrooborudovaniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii. GOST R 54073-2010* (Power supply system for aircraft and helicopters. General requirements and standards of power quality, State Standard R 54073-2010), Moscow, Standarty, 2011, 34 p.