

Энергоэкономичная комбинированная система электроснабжения с высоким качеством электроэнергии для концепции «полностью электрифицированного самолета».

В.В. Бочаров, В.А. Постников, С. Б. Резников, И.А. Харченко

Аннотация.

Рассматриваются проблемы энерго- и топливосбережения и повышения качества электроэнергии в автономных системах электроснабжения (АСЭС) для перспективных летательных аппаратов с энергоемким преимущественно или полностью электрифицированным оборудованием (СЭС ЛА с ПЭО). Описана структура энергоэкономичной комбинированной СЭС переменного-постоянного тока без промежуточного привода постоянной частоты вращения для генератора переменного тока с высокой степенью электроэнергетической совместимости, т.е. с минимальным последовательным преобразованием электроэнергии на пути от генератора до потребителя. Материал представляется полезным для разработчиков АСЭС различного применения на различных транспортных объектах.

Ключевые слова:

автономная система электроснабжения; перспективный самолет; полностью электрический самолет - ПЭС; асинхронный стартер-генератор; инвертор синусоидального напряжения; энергоснабжение.

Введение.

Силовые установки (СУ) автономных систем электроснабжения (АСЭС), используемые в качестве привода для электрогенераторов (авиадвигатели, бензо-, газо- и дизельные двигатели, ветротурбины и др.) обычно имеют переменную частоту вращения. Однако современное электрооборудование в основном рассчитано на питание переменным током стабильной частоты (трех- или однофазным 50 или 400 Гц). Для его обеспечения

используются либо синхронные генераторы (СГ) с промежуточным электромеханическим гидроприводом постоянной частоты вращения (ППЧВ), либо альтернативные первичные источники электропитания (электрохимические, емкостно-накопительные, генераторно-выпрямительные и др.), снабженные полупроводниковыми или электромашинными (двигатель–генераторными) преобразователями (вторичными источниками электропитания – ВИЭП) с выходным синусоидальным напряжением стабильной частоты. Помимо этого АСЭС снабжаются аварийно-резервными аккумуляторными батареями с относительно низким напряжением (например, 28 В).

В последние десятилетия явно обозначилась тенденция увеличения мощности и усложнения характера потребителей электроэнергии, в частности обсуждается концепция «полностью электрифицированного самолета» - ПЭС. Это обстоятельство вызывает необходимость большую часть нагрузок АСЭС переводить на питание от подсистем распределения повышенного напряжения (270 В и более) [1-6].

При этом для резервирования цепей питания и снижения степени воздействия коммутационных и других нелинейных возмущений со стороны нагрузок на качество питающей электроэнергии используется параллельная работа расщепленных (по числу СУ) каналов питания.

Так как параллельная работа синхронных генераторов с индивидуальными приводами затруднена, то в СЭС перспективных летательных аппаратов с энергоемким электрооборудованием предусмотрено использование распределительной системы повышенного постоянного напряжения (ППН270В) [1,2].

К несомненным достоинствам подсистемы ППН270В относятся следующие [2]:

– отсутствие ППЧВ, имеющих либо низкий КПД (например, 0.4...0.5 для пневмо- и гидролопаточных приводов), либо несоразмерно высокие расходы на приобретение, эксплуатацию, частые ремонтно-регламентные и регулировочные работы и связанные с ними простои транспорта (особенно для интегрального привод-генератора) [1], а также склонность к возникновению автоколебаний и провалов частоты при циклических и резко набрасываемых нагрузках;

– простота обеспечения параллельной работы каналов для повышения установленной сетевой мощности и живучести («горячее резервирование»);

– отсутствие реактивной мощности и падений («потерь») напряжения, на индуктивностях кабелей и обмоток;

– минимум числа и высокий КПД преобразователей для большинства потребителей, в частности инверторов с синусоидальным выходным напряжением 115/200 В, 400 Гц и т.п.;

– возможность использования буферных емкостных накопителей и аккумуляторных батарей (с повышенным напряжением);

– высокое качество электроэнергии.

Основным недостатком подсистемы распределения ППН, до настоящего времени сдерживающим их применение в авиации и по существу нейтрализующим все вышеупомянутые достоинства, является необходимость оснащения многочисленных сетевых контакторов и автоматов защиты громоздкими и недолговечными дугогасительными камерами. Любая попытка реализации бездугового расцепления, например, с помощью транзисторов, вакуумных выключателей, запираемых тиристоров и др. приборов натывается на сложность быстрого рассеивания без перенапряжения электромагнитной энергии последовательно-предвключенных сетевых индуктивных элементов (кабелей, проводов, обмоток, и т.п.), которые в отличие от нагрузочных индуктивностей нельзя шунтировать обратными диодами. Возможность шунтирования предвключенных индуктивностей вместе с источником фильтровыми электролитическими конденсаторами с относительно большой энергоемкостью ограничена, во-первых, их нетермостойкостью и низкой надежностью, а во-вторых - опасностью возникновения разрядных свертхов и соответствующих мощных электромагнитных импульсов (ЭМИ) при пробоях и коротких замыканиях.

Однако нельзя считать исчерпанными попытки применить в системах ППН традиционные контакторы и реле, а также транзисторные коммутаторы с разгрузочными резисторами и полупроводниковыми ограничителями напряжения (ПОН).

В [2,3,4] рассмотрены распределительные системы ППН (СППН) на базе схемы бездугового расцепления (СБР) с плавающим потенциалом специально введенной коммутационной шины (ППКШ). Управление потенциалами питающей и коммутационной шин осуществляется от специализированного емкостного обратимого делителя постоянного напряжения (ОДПН) с транзисторным импульсным модулятором – регулятором потенциалов.

В [2] рассмотрены схемы бездугового расцепления для контакторов защиты транспортного тягового электропривода на базе комбинации электромеханического контактора, электронного ключа, разгрузочных резисторов и нелинейных ограничителей напряжения. Они позволяют не только максимально быстро выключить аварийную цепь питания с постоянным повышенным напряжением, но и осуществить полную гальваническую развязку между питающей сетью и нагрузками, что не предусмотрено в транзисторных аппаратах защиты и коммутации [5].

Основными схмотехническими способами повышения энергоэкономичности АСЭС

без ППЧВ при обеспечении преемственности по отношению к стандартному бортовому электрооборудованию представляются выбор многоканальной структуры с высокой степенью электроэнергетической совместимости, т.е. с наименьшим числом последовательных преобразований («малокаскадных») на пути от первичного источника до потребителей электроэнергии.

Комбинированная АСЭС на базе синхронных генераторов.

На рис. 1 представлена упрощенная структура одного канала многоканальной комбинированной автономной системы электроснабжения без ППЧВ с первичной подсистемой генерирования и распределения переменного тока нестабильной частоты и тремя вторичными подсистемами распределения: 1) СЧ – стабильной частоты (115/200 В, 400 Гц); 2) ППН – повышенного постоянного напряжения (0 ± 135 В) и 3) НПН – низкого постоянного напряжения (± 27 В).

В ее состав входят: силовая установка (СУ, например, авиадвигатель - АД), синхронный генератор переменного тока (СГ~), распределительное устройство трехфазного напряжения нестабильной частоты $PY_{3\phi}$ (200 В, $f - var$), активный выпрямитель (АВ) со звеном повышенной частоты (ЗПЧ) (например, на базе циклоинверторов с коррекцией коэффициента потребляемой мощности – ККМ и аварийных трансформаторно-выпрямительных устройств – ТВУ с расщепленными каналами), автономный трехфазный обратимый инвертор стабильной частоты (ОИСЧ), распределительное устройство трехфазного напряжения 115/200 В стабильной частоты $PY_{3\phi}$ (200 В, 400 Гц), распределительное устройство постоянного повышенного напряжения (270 В) с заземленной средней точкой (РУ ППН 0 ± 135 В), распределительное устройство низкого постоянного напряжения 27 В (РУ НПН, ± 27 В), а также аварийно-резервные устройства (АРУ, отделены пунктиром): аккумуляторная батарея (АБ) с напряжениями ± 135 В и ± 28 В, снабженная транзисторным блоком активного выравнивания напряжений (БАВН), зарядное устройство (ЗУ) с питанием от АВ и повышающий конвертор (ПК) (возможно-обратимый) для аварийного питания РУ-ППН от РУ-НПН.

Для применения в качестве магистрального синхронного генератора (СГ~) магнитоэлектрического генератора (МЭГ) с постоянными магнитами в его приводном устройстве предусмотрен быстродействующий расцепитель (БР), защищающий всю систему от сверхтоков короткого замыкания в его якорной цепи.

В отличие от распределительной системы ППН с ППКШ [2,3,4] в рассматриваемой структуре (рис.1) вместо диодов в цепи коммутационной шины Ш_к применены тиристорные

группы (VS_+ и VS_-). Это дает возможность исключить пульсации потенциалов на входных зажимах отключенных нагрузок при коммутационных манипуляциях. Пунктиром также показаны цепи диодного шунтирования ($VD_{ш}$) индуктивных нагрузок.

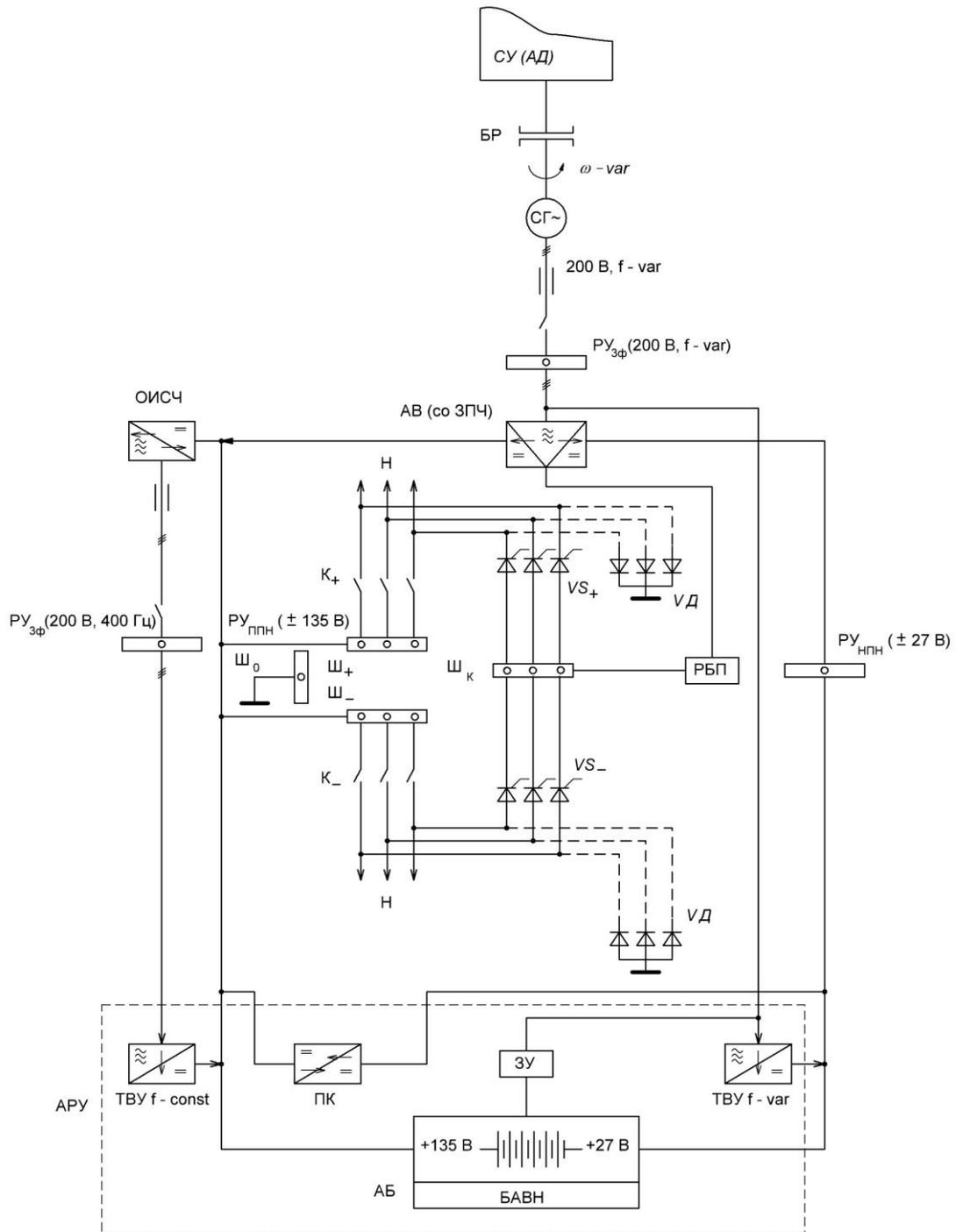


Рис. 1. Канал комбинированной АСЭС с первичной подсистемой синхронного генерирования и распределения переменного тока нестабильной частоты (200 В, $f - var$) и тремя вторичными подсистемами распределения: 1) СЧ - стабильной частоты (115/200 В, 400 Гц); 2) ППН - повышенного постоянного напряжения (0 ± 135 В) и 3) НПН - низкого

постоянного напряжения (0 ± 27 В).

Кроме того, в рассматриваемой структуре используется вариант двухпроводной СППН с ППКШ и заземленной нулевой шиной $Ш_0$ (СППН 0 ± 135 В). Здесь для питания коммутационной шины ($Ш_K$) использован регулируемый блок питания (РБП) с двуполярным выходным потенциалом относительно нулевого (заземленного) провода питания и нулевой шины ($Ш_0$).

В качестве потребителей могут использоваться нагрузки с заземленным «минусом» 135 В, с заземленным «плюсом» 135 В и с заземленной «средней точкой» 270 В. К достоинствам этой системы относится также пониженное рабочее напряжение на изоляции кабелей, проводов и распределительных шин относительно заземленного корпуса объекта («заземления»), благодаря чему ослабляется процесс старения изоляции, повышается ее надежность и электробезопасность, снижается вероятность дугообразования в контактах и уменьшаются перенапряжения на размыкающих транзисторах.

В составе АСЭС в качестве первичного источника можно применить многофазный регулируемый или нерегулируемый (с постоянными магнитами) вентильный генератор постоянного тока или трехфазный синхронный генератор без ППЧВ и регулируемый (или нерегулируемый) выпрямитель.

Для повышения КПД преобразования регулируемый выпрямитель в некоторых случаях целесообразно выполнять интегрированным со схемой транзисторного корректора коэффициента потребляемой мощности (ККМ), исключая высшие гармоники во входном токе, а следовательно и потери в первичной сети, а также переразмеривание генератора.

В качестве выходного емкостного фильтра в ККМ обычно используется батарея электролитических конденсаторов. Однако электролитические конденсаторы являются малонадежными элементами, особенно в широком диапазоне рабочих температур, и в большинстве случаев неприменимы. Поэтому для рассматриваемых систем представляется целесообразным в составе преобразователей переменного тока применять пленочные (или бумажные) буферные конденсаторы, а их малую энергоемкость компенсировать активной фильтрацией с помощью ШИМ-управления транзисторными выравнивающими модуляторами. Можно также применять схемы импульсных транзисторных выпрямителей или выходных конверторов. В этих случаях для питания плюсовой, минусовой и коммутирующей шин понадобятся три вторичных источника: с постоянным положительным потенциалом, с постоянным отрицательным потенциалом и с регулируемым двуполярным

потенциалом относительно шины заземления.

В заключение раздела перечислим основные достоинства рассмотренной многоканальной СЭС без ППЧВ:

– преемственность в отношении традиционного авиационного электрооборудования, в особенности – электромеханических контакторов, реле и автоматов защиты сети;

– высокая энергоэкономичность благодаря высокой степени электроэнергетической совместимости, т.е. минимизации последовательных преобразований («малокаскадности»), высокому КПД, минимизации реактивной мощности в каналах генерирования и распределения переменного тока, установке ККМ и ИЕП вместо индуктивных балластов;

– многократное аварийное резервирование и параллельное включение каналов питания, т.е. высокая «живучесть» и функциональная надежность (в том числе и за счет использования АБ с повышенным напряжением, селективной защиты и аварийных преобразователей);

– при сохранении общеизвестных преимуществ канала распределения постоянного повышенного напряжения 270 В снижение вдвое рабочего потенциала (до 135 В) изоляции проводов, контакторов, полупроводниковых ключей, т.е. снижение вероятности пробоя и интенсивности старения изоляции, снижение коммутационных перенапряжений на транзисторах и вероятности дугообразования в контакторах и реле.

Комбинированные АСЭС на базе асинхронных генераторов.

По мере совершенствования схемотехнических решений при разработках высокоэффективных инверторов синусоидальных напряжений (ИСН), в частности – на базе импульсного обратимого делителя постоянного напряжения (ОДПН) [2], появляется возможность реализации АСЭС на базе асинхронных стартер-генераторов с самовозбуждением через регулируемые ИСН (РИСН).

На рис. 2 показана структура комбинированной системы электроснабжения переменного-постоянного тока без приводов постоянной частоты вращения (ППЧВ) на базе параллельных асинхронных стартер-генераторов (АС/Г) с самовозбуждением через РИСН для перспективной концепции «самолетов с преимущественно (полностью) электрифицированным оборудованием» (СПЭО).

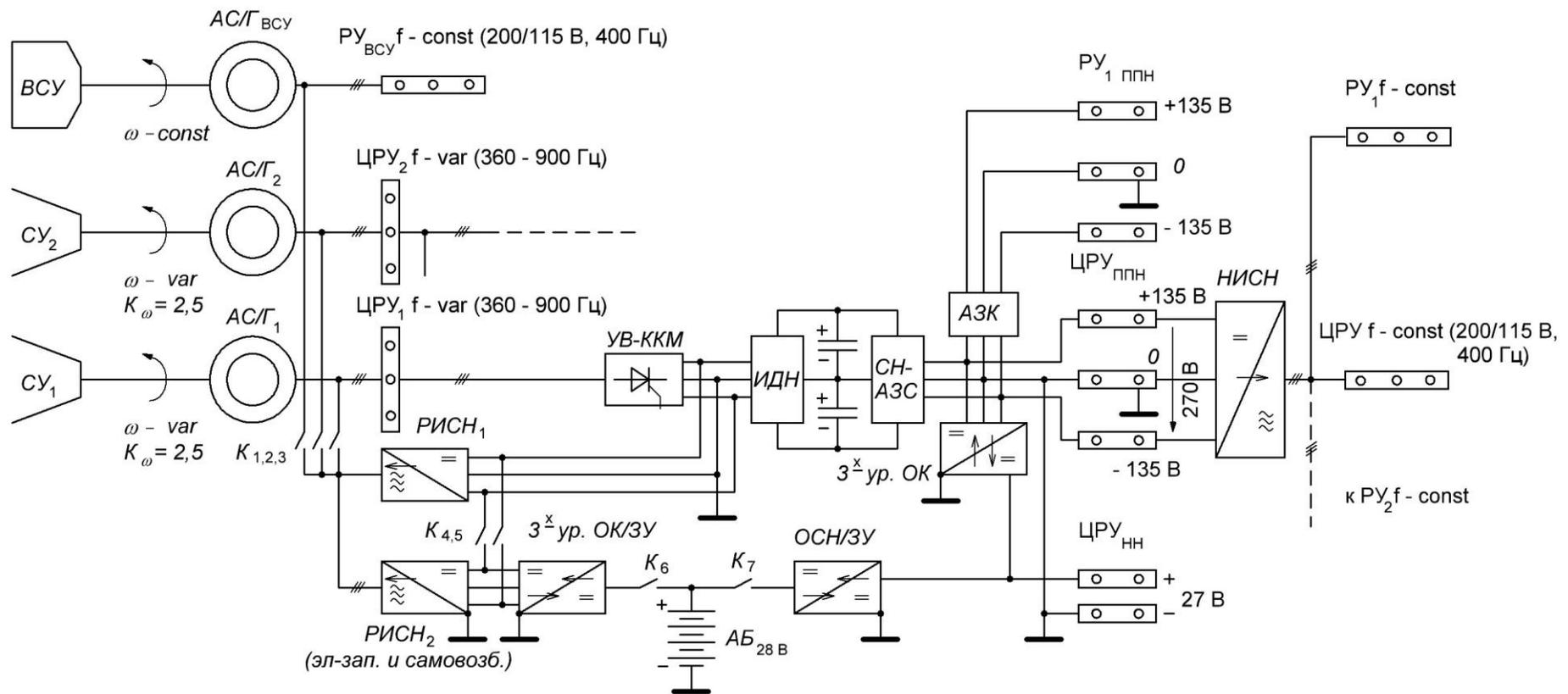


Рис. 2. Структура комбинированной системы электроснабжения переменного-постоянного тока без ППЧВ на базе параллельных асинхронных стартер-генераторов (АС/Г) с самовозбуждением через регулируемые инверторы синусоидального напряжения (РИСН) для перспективной «концепции» самолетов с преимущественно (полностью) электрофицированным оборудованием («СПЭО»).

Обозначения узлов: $СУ_1, СУ_2$ – маршевые силовые установки, ВСУ – вспомогательная силовая установка, ЦРУ и РУ – центральные и периферийные распределительные устройства, УВ-ККМ – управляемый выпрямитель с корректором коэффициента мощности, ИДН – импульсный делитель напряжения, ЕФ – емкостной фильтр, СН-АЗС – стабилизатор напряжения и автомат защиты сети, АЗК – аппараты защиты и коммутации, НИСН и РИСН – нерегулируемые и регулируемые инверторы синусоидального напряжения, ОК/ЗУ – обратимый конвертор/зарядное устройство, ОСН/ЗУ – обратимый стабилизатор напряжения/зарядное устройство, АБ – аккумуляторная батарея, ППН и НН – постоянное повышенное и низкое напряжение (0 ± 135 В и 27 В), $K_1, K_2 \dots K_7$ – контакторы, 3^x ур. ОК – трехуровневый обратимый конвертор.

Приведенная структура не требует особых пояснений; однако представляется необходимым привести примеры схемной реализации основных ее узлов.

На рис. 3 приведена принципиальная схема канала комбинированной СЭС \sim/\neq тока на базе асинхронного стартер-генератора (АС/Г) с самовозбуждением через обратимый амплитудно-частотный регулятор (АЧР), с бесконтактным синхронным компенсатором, включающем вращающийся выпрямитель и синхронный возбудитель с регулятором напряжения (СК-ВВ-СВ-РН) и с низковольтным аккумуляторным резервированием. Схема соответствует структуре СЭС, приведенной на рис. 2, но позволяет рассматривать принципы работы нерегулируемого и регулируемого инверторов синусоидального напряжения (НИСН и РИСН), а также трехуровневого обратимого конвертора (3^x ур. ОК). Использование бесконтактного синхронного компенсатора с мощным демпферным контуром и синхронным возбудителем (СВ) позволяет улучшить качество электроэнергии ЦРУ_{f-var} в переходных процессах и существенно разгрузить РИСН.

Силовые схемы НИСН и РИСН однотипны [2]. Каждая из них содержит три идентичных модуля, представляющего собой обратимый инвертирующий (понижающе-повышающий) двухключевой симметричный импульсный конвертор с общей точкой конденсаторных фильтров, подключенных к общему источнику питания с постоянным напряжением $U_{II} = 400$ В, которое обеспечивается двумя повышающими стабилизаторами напряжения СН₁, СН₂.

В течение каждого полупериода $T/2$ выходного фазного синусоидального напряжения благодаря широтно-импульсной высокочастотной модуляции одного из двух ключей происходит передача энергии одного из конденсаторов стойки в другой. При этом напряжение каждого конденсатора является знакопостоянным и пульсирует по закону $u_c(t) = U_m |\sin(\omega t)|$, где $\omega = 2\pi/T$, $U_m = 163$ В – амплитуда пульсаций, а потенциал средней точки

конденсаторной стойки относительно заземленной средней точки (0) входного фильтра $C_1 - C_2$ имеет синусоидальную форму $U_A(t) = U_m|\sin(\omega t)|$, где $U_m = 163 \text{ В}$ – амплитуда выходного фазного напряжения инвертора (действующее значение 115 В).

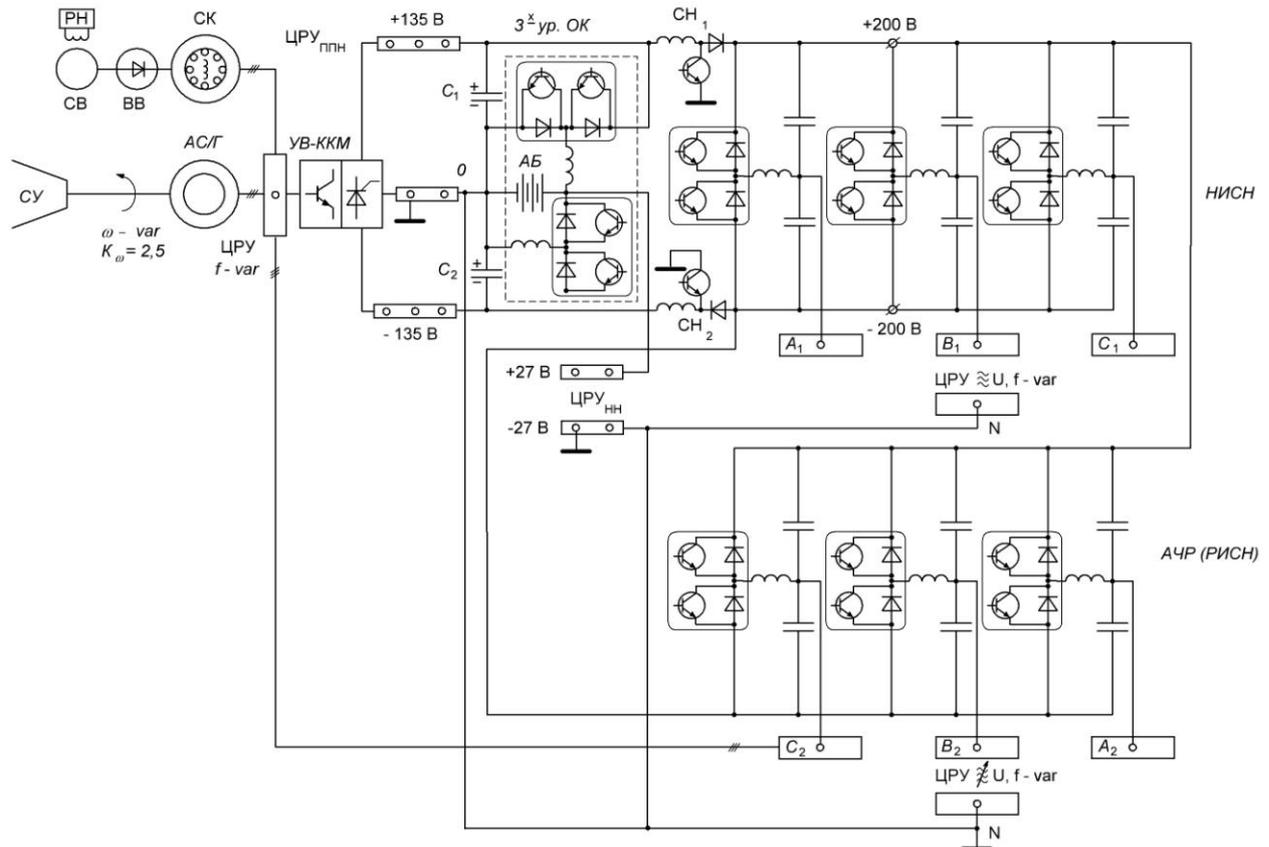


Рис. 3. Принципиальная схема канала комбинированной СЭС \sim/\approx тока на базе АС/Г с самовозбуждением через обратимый трехфазный амплитудно-частотный регулятор (АРЧ), с бесконтактным синхронным компенсатором (СК-ВВ-СВ-РН) и с низковольтным аккумуляторным резервированием.

С помощью схемы управления с цепями обратных связей реализуется стабилизация или регулирование амплитуды, частоты и временной фазы каждого из выходных фазных напряжений инвертора. В частности, на выходе НИСН генерируется трехфазное напряжение стабильной частоты 115/200 В, 400 Гц, а на выходе АЧР (РИСН) – трехфазное напряжение с регулируемой временной фазой емкостного (опережающего) характера, обеспечивающее самовозбуждение асинхронного стартер-генератора в генераторном режиме и постоянный двигательный электромагнитный момент в стартерном режиме (с условием $U/f = \text{const}$). Описанный способ преобразования постоянного напряжения защищен приоритетом РФ.

Трехуровневый обратимый конвертор (3^{ур.} ОК), взаимосвязывающий центральные

распределительные устройства постоянного повышенного напряжения (ЦРУ_{ПНН} с напряжениями 0 ± 135 В) и низкого напряжения (ЦРУ_{НН} с напряжениями ± 27 В), содержит два однотипных двухключевых обратимых конвертора, работающих либо в режиме понижения напряжения 135 В в 27 В, либо в режиме повышения напряжения, причем один – с сохранением полярности, а второй – с инвертированием полярности напряжения (рис. 3).

На рис. 4 приведена принципиально новая схема трехуровневого обратимого импульсного конвертора, содержащего вдвое меньше транзисторных широтно-импульсных модуляторов (VT_1 и VT_2) и три дополнительных управляемых вентиля (тиристоры VS_1 , VS_2 и транзистор VT_3), а также двухобмоточный дроссель (трансреактор $N_{1,2}$). Схема также защищена приоритетом РФ на полезную модель. Работа схемы наглядно демонстрируется токовыми цепями в режимах понижения (рис. 4а) и повышения напряжения (рис. 4б). В примечании к подрисуночной надписи приведены соотношения для коэффициента трансформации трансреактора ($K_{ТР}$).

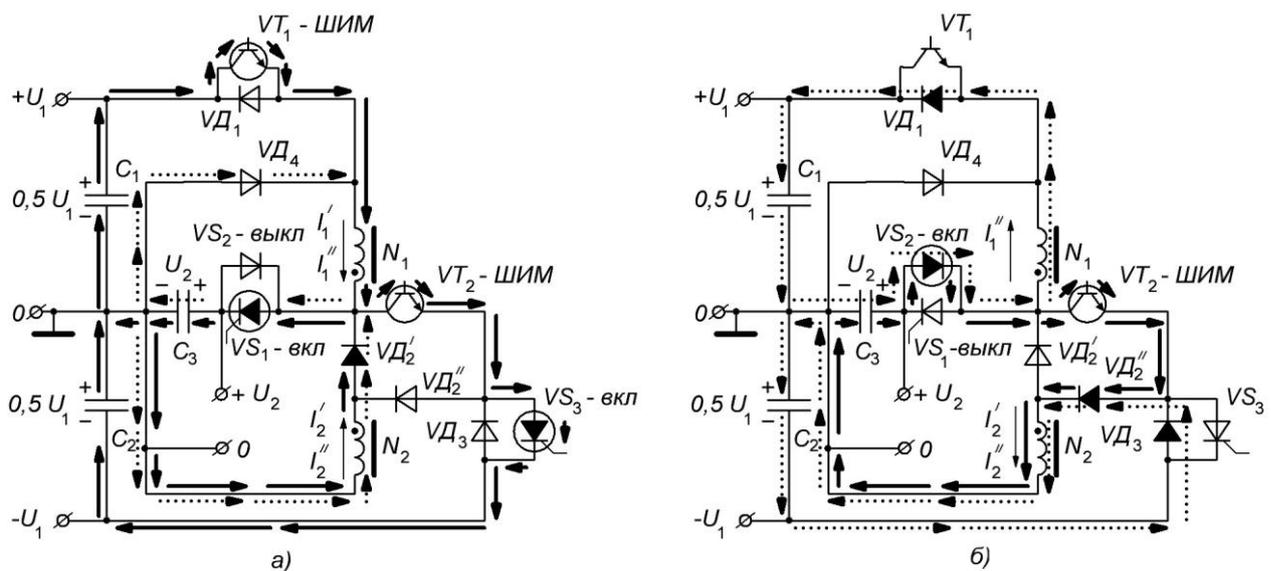


Рис. 4. Трехуровневый двухмодуляторный обратимый конвертор:

а) в режиме понижения ($U_1 \rightarrow U_2 < 0,5 U_1$);

б) в режиме повышения ($U_2 \rightarrow U_1$).

Примечание: при $U_1 = 270$ В, $U_2 = 27$ В,

$$K_{об} = \frac{N_1}{N_2} = 1 - 2 \cdot \frac{U_2}{U_1} = 1 - 2 \cdot K_U = 0,8, \quad \text{а также} \quad K_U = \frac{U_2}{U_1} = 0,1.$$

На рис. 5 приведен рациональный вариант схемы трехфазного управляемого выпрямителя с корректором коэффициента мощности (УВ-ККМ), обеспечивающий питание

НИСН и РИСН напряжениями 0 ± 200 В и ЦРУ_{ПНН} напряжениями 0 ± 135 В и объединенный со стабилизаторами напряжения – автоматами защиты сети (СН/АЗС). Для обеспечения ККМ здесь применена так называемая схема Виенна – выпрямителя с заземлением средней точки выходного фильтра и нейтрали источника, а также с тремя двунаправленными транзисторными стойками. Выходной конденсаторный фильтр ($C_1 - C_2$) снабжен уравнивающим импульсным делителем напряжения (ИДН $VT_{1,2} - L$).

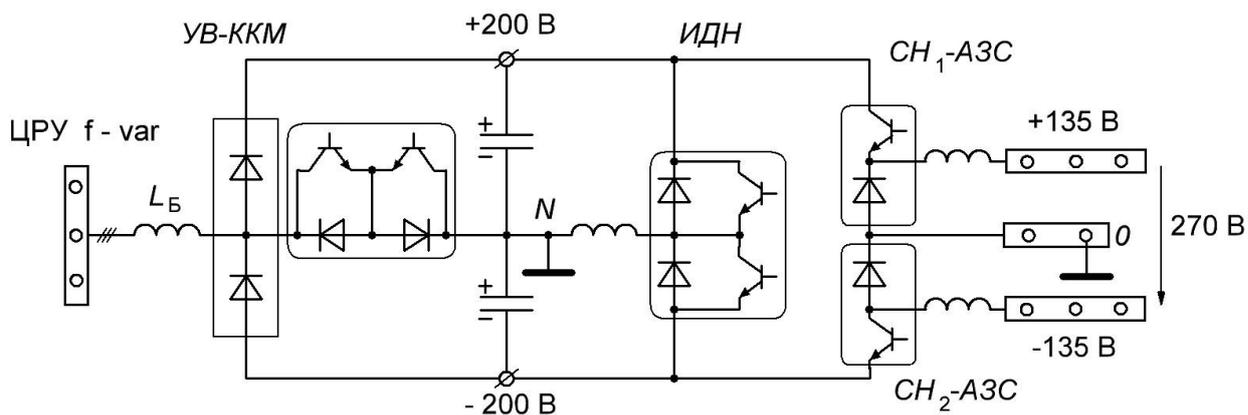


Рис. 5. Схема трехфазного управляемого выпрямителя с корректором коэффициента мощности (УВ-ККМ) со стабилизаторами напряжения – автоматами защиты сети (СН-АЗС) и импульсным делителем напряжения (ИДН) на базе схемы Виенна-выпрямителя с коррекцией мощности.

Заключение.

1. Обе рассмотренные структуры СЭС \sim/\neq тока без приводов постоянной частоты вращения (с синхронными и асинхронными генераторами) являются достаточно энергоэкономичными благодаря отсутствию тепловых потерь в гидро- или пневмоприводах, повышенным напряжениям в распределительных каналах, отсутствию излишней каскадности преобразования энергии от источников к потребителям (с различными видами и параметрами питания), благодаря минимизации потерь от высших гармоник токов и напряжений в цепях переменного тока и магнитопроводах обмоток, использованию режимов рекуперативного торможения в электроприводах с возвратом энергии в сеть постоянного тока, а также благодаря экономии расхода топлива на транспортировку и охлаждение лишней массы каскадных преобразователей, то есть минимизации их так называемой «полетной» («стартовой») массы.

2. Обе структуры СЭС способны обеспечить оптимальные показатели качества электроэнергии для большинства потребителей, распределенных по питанию от различных

ЦРУ (нестабильной частоты, постоянного повышенного напряжения, стабильной частоты и постоянного низкого напряжения), благодаря корректорам коэффициента мощности, стабилизаторам напряжения и фильтрам, а также благодаря параллельной работе однотипных источников и преобразователей энергии, обеспечивающей сложение их установочных мощностей. Функциональная надежность и «живучесть» в обеих системах достаточно высоки благодаря относительной простоте и многократному резервированию каналов и узлов питания и преобразования.

3. Системы с синхронными генераторами (с электромагнитным или магнитоэлектрическим возбуждением) могут иметь выигрыш по установленной и «полетной» массе благодаря снижению циркулирующих реактивных мощностей, а системы с асинхронными генераторами выигрывают по надежности, массе, технологичности и стоимости, определяемыми в основном самими генераторами.

4. Рассмотренные комбинированные СЭС могут быть рекомендованы для преимущественного поэтапного внедрения при разработках перспективных летательных аппаратов с преимущественно или полностью электрифицированным оборудованием (концепция «ЛА с ПЭО»).

Библиографический список

1. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В двух томах /под ред.С.А.Грузкова-М.: Издательство МЭИ, Том 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов, 2005 – 568 с.

2. Резников С.Б., Бочаров В.В., Кириллов В.Ю., Постников В.А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость транспортного электрооборудования с высоковольтными цепями питания. –М. : Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010-512с.

3. А.С. СССР № 143503 от 1989 г. Устройство для коммутации цепей питания потребителей электроэнергии / Бочаров В.В., Болдырев В.Г., Дубенский Г.А., Красильников А.А., Резников С.Б., Бюлл. № 20, от 30.05.1989 г.

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, № 3, 2011г., с.4-6.

5. Машуков Е.В., Шевцов Д.А., Улященко Г.М. Транзисторные аппараты защиты и коммутации для авиационных систем распределения электроэнергии. -М., Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009.-188с.

6. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. ГОСТ Р 54073-2010, Москва, Стандартинформ, 2011.

Сведения об авторах

Бочаров Владимир Владимирович, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499)158-4529; e-mail: e.bocharowa@yandex.ru

Постников Валерий Александрович, декан факультета Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., профессор.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499)158-2731; e-mail: dean3@mai.ru

Резников Станислав Борисович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499)158-4529; e-mail: rezn41@mail.ru

Харченко Игорь Александрович, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

phone: (499) 158-4529; e-mail: ihar@mail333.com