

Комбинированные автономные системы электроснабжения переменного и постоянного тока с повышенным качеством электроэнергии и ЭМС

Станислав РЕЗНИКОВ,
Д. Т. Н.
rezn@formatek.ru
Евгений ПАРФЕНОВ
Николай ГУРЕНКОВ

В статье рассмотрены альтернативные варианты компромиссного сочетания достоинств каналов переменного и постоянного тока комбинированных автономных систем электроснабжения, позволяющие обеспечить высокое качество электроэнергии и ЭМС, а также бездуговую коммутацию за счет многоканальных преобразующих и управляющих трактов. Варианты представляются рациональными для различных совокупностей технических требований.

Наиболее распространенным видам и параметрам электроэнергии автономных систем электроснабжения (АСЭС) относятся повышенное переменное трехфазное напряжение стабильной частоты (380/220 В, 50 Гц или 200/115 В, 400 Гц), а также постоянное низкое напряжение с аккумуляторным резервированием питания (27, 24, 12 В). В последние десятилетия в связи с широким внедрением высоковольтных и мощных полупроводниковых ключей (IGBT и полевых транзисторов и запираемых тиристоров) в АСЭС в дополнение к указанному все чаще находят применение постоянное повышенное напряжение — ППН (± 270 , ± 440 , ± 750 В) [1–4].

Достоинства классических трехфазных систем переменного тока стабильной частоты — бездуговая коммутация, прямое питание асинхронных электродвигателей и согласующих трансформаторов. А основные недостатки — это сложность (а чаще — практическая невозможность) обеспечения параллельной работы каналов питания, повышение тепловых потерь, индуктивных потерь напряжения и установленной мощности узлов и проводов из-за ее реактивной составляющей, а также нежелательность применения малонадежных, неудобных в эксплуатации, с низким КПД гидро- и пневмоприводов постоянной частоты вращения (ППЧВ).

К несомненным достоинствам распределительных систем постоянного повышенного напряжения (СППН) можно отнести следующие [3, 4]:

- отсутствие ППЧВ и присущих им недостатков;

- простота обеспечения параллельной работы каналов (повышение суммарной сетевой мощности и «горячее» резервирование);
- отсутствие реактивной мощности и связанных с ней активных потерь и индуктивных потерь напряжения;
- минимум преобразователей для большинства потребителей;
- возможность использования буферных емкостных накопителей (а иногда и аккумуляторов с повышенным напряжением);
- высокое качество электроэнергии.

Основным недостатком СППН, до настоящего времени сдерживающим их применение и по существу нейтрализующим все вышеупомянутые достоинства, является необходимость оснащения сетевых контакторов и автоматов защиты громоздкими и недолговечными дугогасительными камерами. Любая попытка реализации бездугового расцепления, например, с помощью транзисторов, вакуумных выключателей, запираемых тиристоров и т. п., приводит к сложности рассеивания энергии предвключенных сетевых индуктивностей без перенапряжений. Однако этот недостаток удалось устранить в так называемой системе «квазипостоянного» повышенного напряжения (КППН) путем введения дополнительного (коммутационного) канала и удвоения числа коммутирующих контакторов [4].

Попытки компромиссного сочетания достоинств обеих систем все чаще приводят к разработкам комбинированных АСЭС (КАСЭС) переменного и постоянного тока с многоканальными преобразующими и управляющи-

ми трактами. Наиболее яркий пример такого сочетания — так называемое преобразование «переменная скорость — стабильная (постоянная) частота» (ПССЧ или ПСПЧ) на базе вентильных генераторов с прямым приводом (без ППЧВ) от силовых установок (СУ), звена (подсистемы) ППН (± 270 В) и статических инверторов синусоидального напряжения (ИСН) [1–4]. В таких системах для повышения качества электроэнергии канала ППН (снижения пульсаций) обычно используются шестифазные магистральные синхронные генераторы с электромагнитным (каскадным) или комбинированным (магнитоэлектрическим и электромагнитным) возбуждением. К их недостаткам относятся относительно большая инерционность, сложность, пониженная надежность и высокая стоимость. Кроме того, такие системы не могут считаться рациональными при больших установленных мощностях нагрузок переменного тока стабильной частоты, так как массо-габаритные, надежные и стоимостные параметры мощных статических ИСН существенно проигрывают ППЧВ.

В связи с этим целесообразно рассмотреть альтернативные варианты компромиссного сочетания достоинств каналов переменного и постоянного тока в КАСЭС. Предлагаются три варианта базовых структур КАСЭС \sim/\neq тока, являющиеся рациональными для различных сочетаний технических требований.

1-й вариант. На базе ППЧВ, каскадного трехфазного синхронного генератора (КСГ), многоканальных, трансформаторно-выпрямительных блоков (ТВБ) и выпрямителей (В)

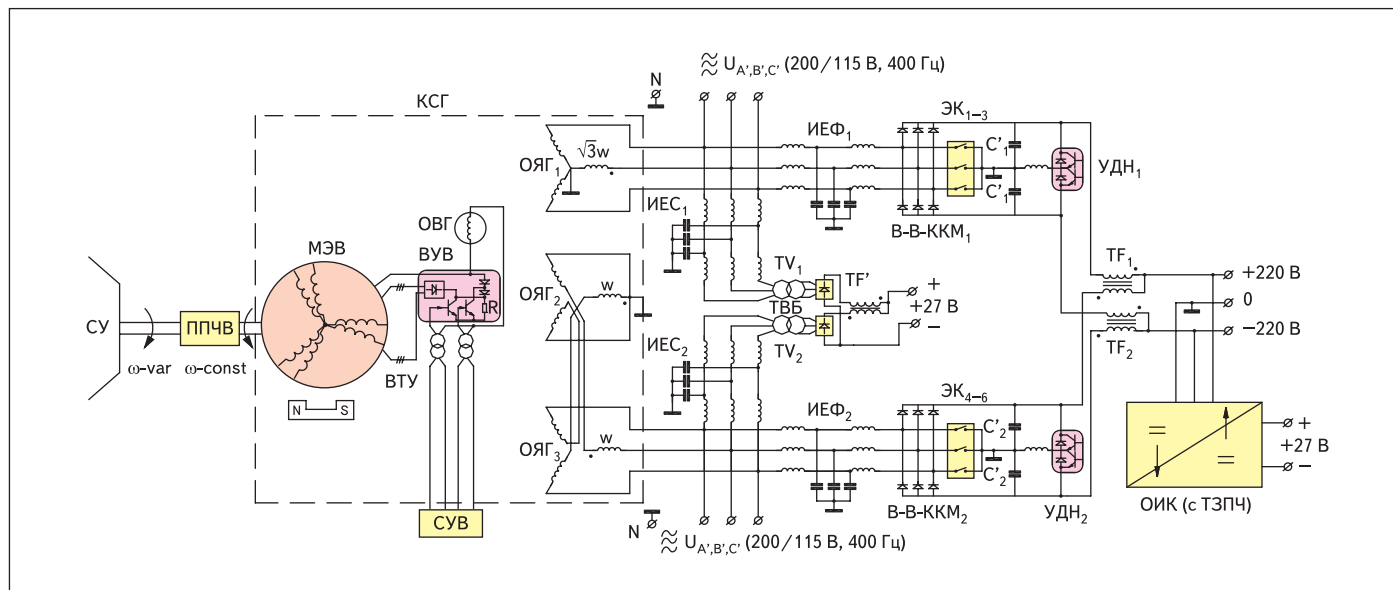


Рис. 1. 1-й вариант. КАСЭС \sim/\neq тока на базе ППЧВ, КСГ, В-В-ККМ ОИК (с ТЗПЧ) (канал постоянного повышенного напряжения 0 ± 220 В; КГС с 3-секционными якорными обмотками $w, w, \sqrt{3}w$; оба канала \sim тока с заземленной нейтралью N)

с предвключенными индуктивно-емкостными фильтрами (стабилизаторами) напряжения (ИЕФ (ИЕС)), Виенна-выпрямителей с корректорами коэффициента мощности (В-В-ККМ) и обратимым импульсным конвертером (ОИК) с трансформаторным звеном повышенной частоты (ТЗПЧ) (рис. 1).

Обозначения на рис. 1: СУ — силовая установка; КАСЭС — комбинированная автономная система электроснабжения; ППЧВ — привод постоянной частоты вращения; КСГ — каскадный синхронный генератор с магнитоэлектрическим возбудителем (МЭВ), вращающимся управляемым выпрямителем (ВУВ) вращающимися трансформаторами управления (ВТУ) и схемой управления возбуждением (СУВ); ИЕС — индуктивно-емкостный стабилизатор напряжения; ТВБ — трансформаторно-выпрямительный блок; ТФ — трансфильтр (уравнительный реактор); В-В-ККМ — Виенна-выпрямитель с корректором коэффициента мощности на базе двуправленных электронных ключей (ЭК) и фильтров (стабилизаторов) переменного (ИЕФ (ИЕС)) и постоянного тока; ОИК (с ТЗПЧ) — обратимый импульсный конвертер с трансформаторным звеном повышенной частоты; УНД — уравнительный делитель напряжения.

В этом варианте обмотка якоря основного генератора (ОЯГ_{1,2,3}) выполнена 3-секционной для каждой фазы (w, w и $\sqrt{3}w$), что позволяет оба канала переменного тока выполнить с общей заземленной нейтралью (N).

Первый каскад КСГ представляет собой магнитоэлектрический возбудитель (МЭВ) с роторной якорной обмоткой, аналогичной ОЯГ_{1,2}, подключенной к роторной обмотке возбуждения основного генератора (ОВГ) через вращающийся управляемый выпрямитель (ВУВ). Управляющие драйверы транзистор-

ных ШИМ-регуляторов ВУВ через вращающиеся трансформаторы управления (ВТУ) подключены к схеме управления возбуждением (СУВ). Режимы работы ВУВ предполагают две комбинации: при VT₁-ШИМ VT₂ — включен, при VT₂-ШИМ VT₁ — включен.

Выходы выпрямителей каналов постоянного повышенного напряжения (0 ± 220 В) и постоянного низкого напряжения (± 27 В) суммируются по току через соответствующие трансреакторы (трансфильтры) (ТФ_{1,2} и ТФ')

Канал постоянного повышенного напряжения (0 ± 220 В) выполнен с заземленным нулем (нейтралью) с опорой на среднюю точку уравнительных делителей напряжения (УДН_{1,2}).

Корректор коэффициента мощности (ККМ) содержит блок обратимых (двусторонних) электронных (транзисторных) ключей (ЭК), обеспечивающих с помощью высокочастотной (60 кГц) широтно-импульсной модуляции синусоидальность кривых потребляемых выпрямителями фазных токов $\cos \varphi_{\text{гарм}} \approx 1$.

Этот вариант выигрывает по сравнению с известными по величине коэффициента мощности на входах каналов с выпрямителями, а также выгодно отличается наличием общей заземленной нейтрали для трех каналов.

Кроме того, в некоторых случаях наличие дополнительного выходного канала с еще более повышенным напряжением (440 В), причем с половинными симметричными потенциалами зажимов относительно корпуса (± 220 В), может представлять значительный интерес благодаря выигрышу в изоляции и потребляемом токе.

Представляет также интерес взаимное резервирование каналов питания 0 ± 220 и ± 27 В,

то есть возможность временного питания обоих каналов от аккумуляторной батареи.

T-образные предвключенные индуктивно-емкостные фильтры (стабилизаторы) напряжения (ИЕФ (ИЕС) 1, 2) выполняют три основные функции обеспечения электроэнергетической и электромагнитной совместимости (ЭЭС и ЭМС) [1]:

- параметрическое демпфирование относительно низкочастотных (субгармонических) возмущений, проникающих в каналы переменного тока со стороны резкопеременных, коммутуемых и импульсно-циклических нагрузок постоянного напряжения (0 ± 220 В);
- двухстороннюю фильтрацию относительно высокочастотных коммутационных помех от выпрямителей, статических преобразователей и релейно-контакторной аппаратуры;
- стабилизацию напряжения питания канала ± 27 В.

К основным достоинствам предлагаемой двухкаскадной структуры КСГ по сравнению с классической 3-каскадной (на базе магнитоэлектрического подвозбудителя, электромагнитного шестифазного возбудителя, неуправляемого вращающегося выпрямителя и шестифазного основного синхронного генератора) относятся следующие:

- улучшенные массо-энергетические и надежность показатели основного трехфазного генератора и трехфазного возбудителя (секции обмоток каждой фазы расположены в общих пазах статорного магнитопровода);
- возможность активного развозбуждения основного генератора за счет резистивного шунтирования ОВ;
- повышенное быстродействие форсировки регулирования возбуждения благодаря от-

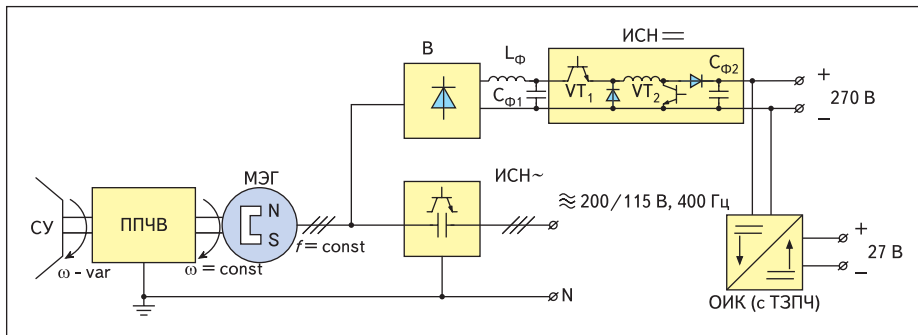


Рис. 2. 2-й вариант КАЭС тока на базе ППЧВ, МЭГ, ИСН (~ или = тока) и ОИК (с ТЗПЧ)

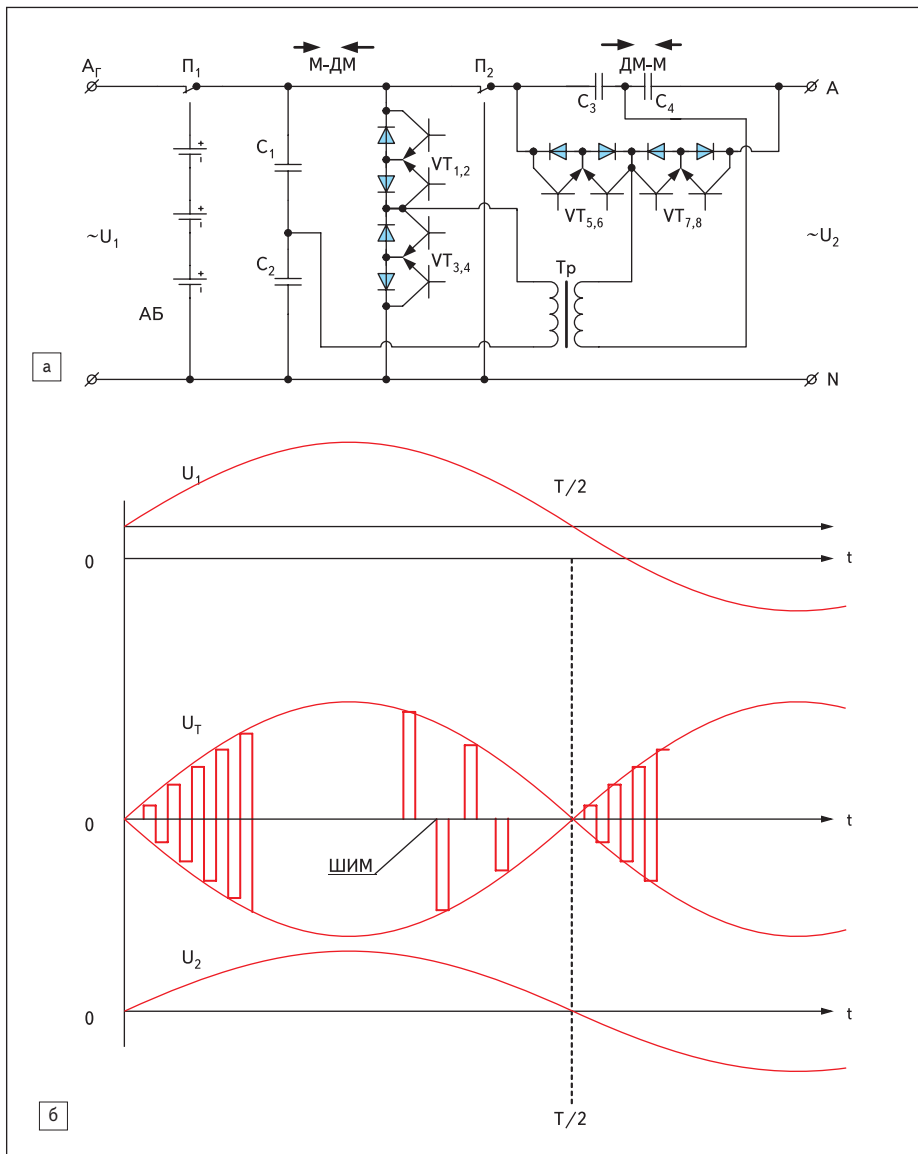


Рис. 3. Схема (а) и временные диаграммы (б) импульсного стабилизатора переменного напряжения (ИСН~) с обратимым вольдобавочным трансформаторным циклоконвертором

сутствию промежуточного каскада (непосредственному управлению током ОВГ с помощью ВУВ).

2-й вариант. На базе ППЧВ, магнитоэлектрического синхронного генератора (МЭГ), импульсных стабилизаторов переменного и постоянного напряжений (ИСН_~ и ИСН₌)

и обратимого импульсного конвертора (ОИК) с трансформаторным звеном повышенной частоты (ТЗПЧ) (рис. 2).

Из бесконтактных синхронных генераторов наиболее простой, компактной и надежной конструкцией обладает нерегулируемый магнитоэлектрический генератор. Несмотря

на относительно жесткую внешнюю характеристику и наличие ППЧВ для обеспечения высокого качества электроэнергии канала 200/115 В, 400 Гц (или 380/220 В, 50 Гц) необходимо использовать импульсный стабилизатор переменного напряжения (ИСН_~), который не только стабилизирует амплитуду напряжения при изменениях нагрузок, но и компенсирует искажения синусоидальности от нелинейных нагрузок, включая выпрямитель в канале ППН (±270 В). Качество напряжения каналов ППН и ±27 В (уровни средних значений и пульсаций) обеспечивается понижающе-повышающим импульсным стабилизатором постоянного напряжения (ИСН₌), а также обратимым импульсным конвертором с трансформаторным звеном повышенной частоты (ОИК с ТЗПЧ).

На рис. 3 приведены схема и временные диаграммы ИСН_~ с обратимым вольдобавочным (вольтвычитающим) трансформаторным циклоконвертором (на базе полумостовых импульсных обратимых модуляторно-демодуляторных блоков (М ↔ ДМ и ДМ ↔ М)).

Следует особо отметить, что трансформатор (Тр) в данной схеме может быть выполнен в двух вариантах: а) в обычном (беззазорном), но с увеличенным рассеянием для реактивного токоограничения и б) в виде трансреактора (с зазором в сердечнике), но с малым рассеянием. При втором варианте демодуляция (ДМ) производится в обратном режиме.

Схема может быть снабжена резервным каналом питания от аккумуляторной батареи (АБ) через переключатели П_{1,2}, подобно системам бесперебойного питания.

3-й вариант. С преобразованием ПССЧ (без ППЧВ) на базе трехфазного инвертора синусоидального напряжения (ТИСН) и ОИК (с ТЗПЧ) (рис. 4).

В этом варианте отсутствуют не только ППЧВ, но и демпфирующие узлы (ИЕС и ККМ), так как на выходе КСГ оба канала переменного тока имеют переменную частоту (400–1000 Гц).

В нем также имеется канал ППН (0 ±135 В) с опорой на средние точки уравнивательных делителей напряжения (УДН_{1,2}). Однако для реализации канала переменного тока стабильной частоты используется относительно сложный и громоздкий статический трехфазный инвертор синусоидального напряжения (ТИСН), что делает этот вариант рациональным для систем с относительно большой нагрузкой канала ППН и канала ±27 В.

Наличие средней (нулевой) шины в канале ППН (0 ±135 В) позволяет использовать наиболее рациональные схемы ТИНС с высоким качеством выходного напряжения.

На рис. 5 приведены принципиальная схема, схемы замещения и диаграммы работы трехуровневого инвертора напряжения на серийных транзисторных модулях [9]. Благодаря диодному заземлению средних точек

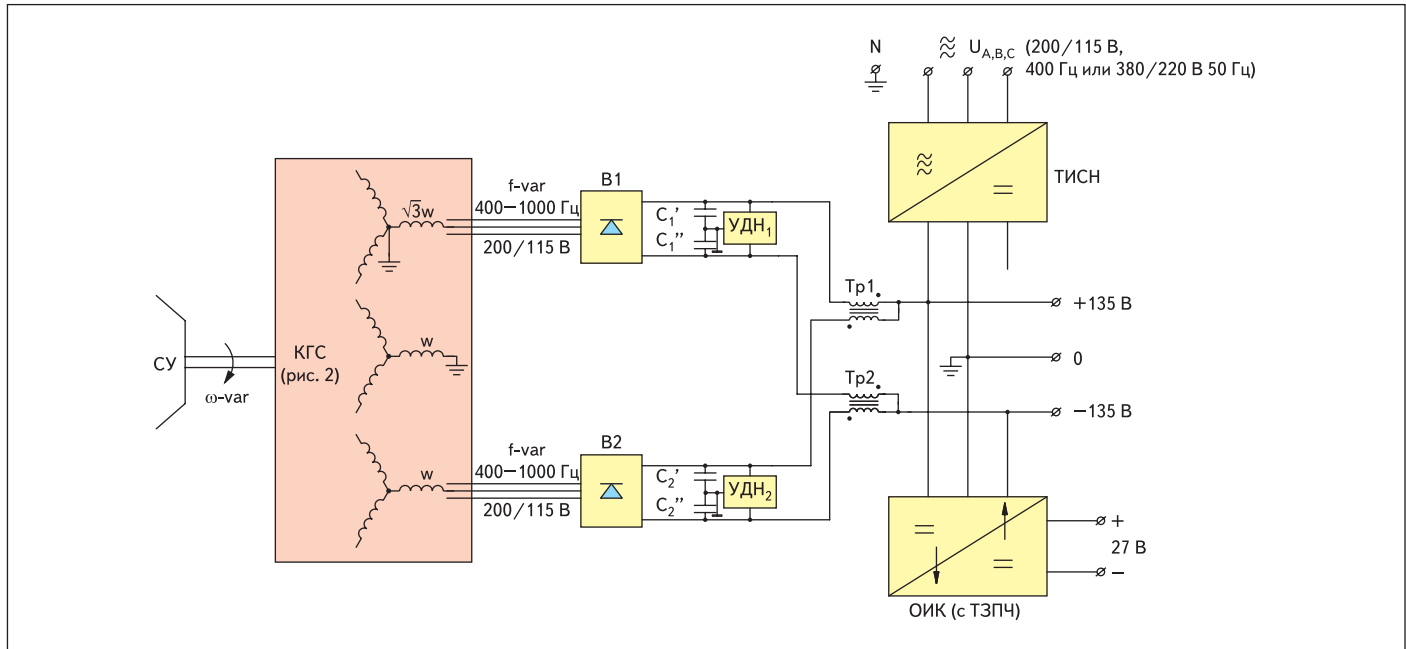


Рис. 4. 3-й вариант КАСЭС \sim/\neq тока с преобразованием ПССЧ (без ППЧВ) на базе трехфазного инвертора синусоидального напряжения (ТИСН) и ОИК (с ТЗПЧ)

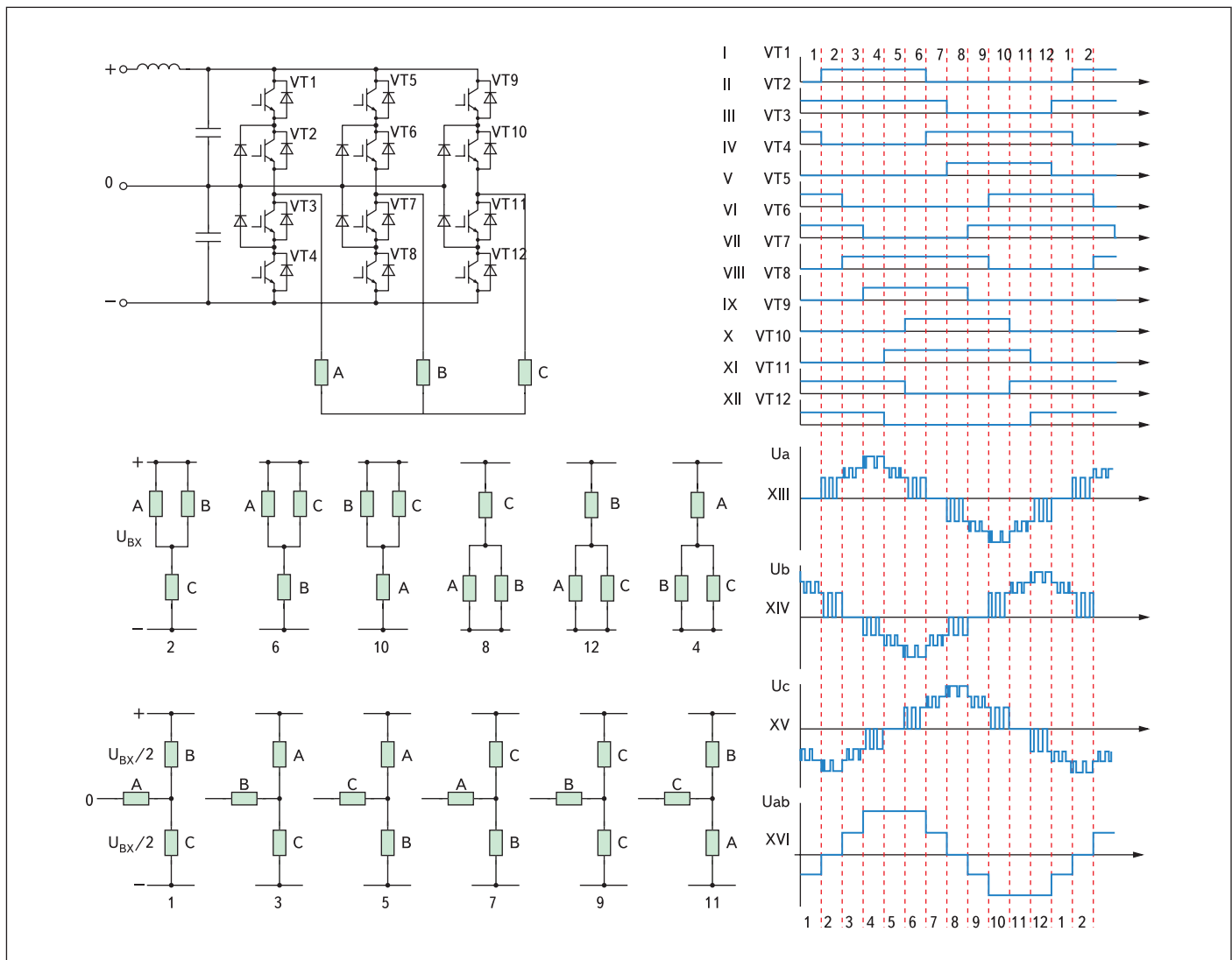


Рис. 5. Схема и диаграммы работы трехуровневого инвертора напряжения на серийных IGBT-модулях

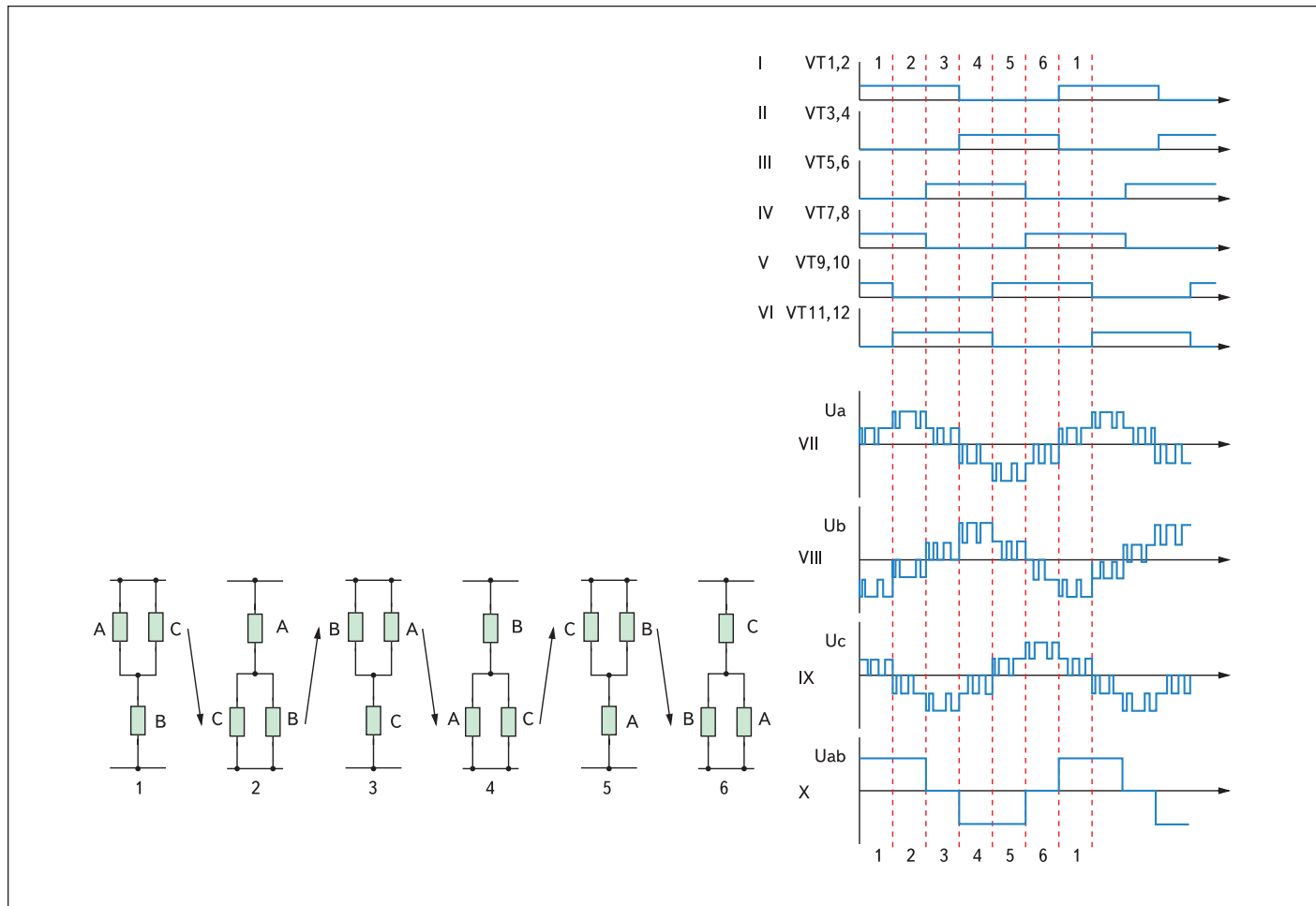


Рис. 6. Диаграммы работы двухуровневого инвертора

парных модулей и их поочередной коммутации (вкл. и выкл.) с временным запаздыванием удастся с помощью широко выпускаемых относительно низковольтных полевых транзисторов заменить дефицитные, дорогие и малонадежные высоковольтные транзисторы. В этой схеме имеется не только возможность получения трехуровневой формы фазных напряжений, но и возможность ШИМ-регулирования на всех уровнях для получения кривой с малыми нелинейными искажениями. Если время запаздывания коммутации второго транзистора каждой пары относительно первого свести к незначительной величине, то схема будет работать как обычная двухуровневая [9]. Схемы замещения и диаграммы работы для этого случая показаны на рис. 6.

Концептуальные распределительные системы КППН на базе активных делителей постоянного напряжения (АДПН), совместимые с бездугowymi контакторами

Предложенная в [4] базовая концепция АДПН позволяет радикально изменить ситуацию и обеспечить в СППН или в канале

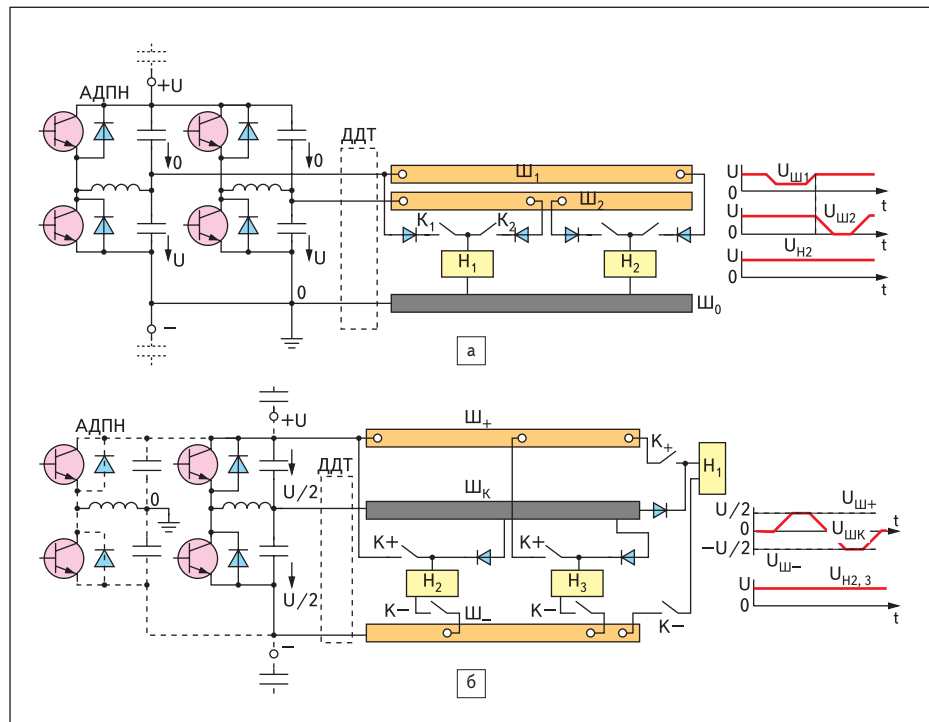


Рис. 7. Распределительные системы квазипостоянного повышенного напряжения (КППН) со схемами бездугowego расщепления (СБР) на базе АДПН: а) с асинхронно-плавающими однополярными потенциалами (АПОП); б) с плавающим потенциалом коммутационной шины (ППКШ)

ППН бездуговое расцепление контакторов, а также с успехом применять групповые бездуговые контакторы, и даже контактные контроллеры (КК) (программные групповые бездуговые контакторы). Для ее обоснования на рис. 7 приведены упрощенные структуры двух распределительных систем КППН со схемами бездугового расцепления (СБР) на базе АДПН: с асинхронно-плавающими однополярными потенциалами (АПОП) и с плавающим потенциалом коммутационной шины (ППКШ) [4].

Первая структура содержит трехпроводный кабель АДПН с расщепленными средними звеньями и по два развязывающих (суммирующих) силовых диода в цепи каждой нагрузки [2, 4]. Вторая структура содержит также трехпроводный кабель, обычный или аналогичный АДПН, и по одному импульсному (кратковременно включаемому) диоду в цепи каждой нагрузки. Обе структуры имеют по три распределительные шины ($Ш_1, Ш_2, Ш_0$ и $Ш_-, Ш_+, Ш_K$), по два бездуговых контактора (K_1, K_2 или K_-, K_+) в цепи каждой нагрузки (H_1) по схеме синхронизации управления АДПН и контакторами и по ДДТ для селективной защиты от пробоев, утечек изоляции и коротких замыканий. На рис. 7 приведены также осциллограммы потенциалов шин ($U_{Ш_{1,2}}, U_{Ш_K}$) и напряжения на остальных нагрузках ($U_{H_{2,3}}$) при отключении данной нагрузки H_1 .

Первая из рассматриваемых систем (рис. 7а) работает следующим образом. В режиме питания H_1 и H_2 оба расщепленных средних звена АДПН дублируют друг друга, обеспечивая короткую своих верхних конденсаторов и заряженность нижних до напряжения питания U , подводимого к нагрузкам через замкнутые контакторы $K_{1,2}$. Для выключения H_1 с помощью левых плеч среднего звена АДПН сначала плавно снижается потенциал $U_{Ш_1}$ шины $Ш_1$, затем выключается обесточенный контактор K_1 , после чего потенциал $U_{Ш_1}$ плавно восстанавливается. Заметим, что на питании других нагрузок указанная манипуляция не сказывается, так как их питание дублируется по шине $Ш_2$. Далее аналогичная манипуляция, но с полным обнулением потенциала, производится с помощью правых плеч среднего звена АДПН для обеспечения аналогичного бездугового выключения контактора K_2 , что также не сказывается на других нагрузках. Попутно заметим, что каждый из кабелей питания $Ш_1$ и $Ш_2$ рассчитан на половинный номинальный ток, невзирая на импульсную (двойную) перегрузку в интервале размыкания контактора.

Во второй системе (рис. 7б) в режиме питания нагрузок H_1, H_2 , и H_3 основное (правое) звено АДПН обеспечивает равную зарядку обоих конденсаторов до половины напряжения питания ($U/2$). Для выключения третьей нагрузки H_3 одновременно плавно обнуляется напряжение верхнего конденсатора и удваивается напряжение нижнего. При этом

бывший нулевой потенциал $U_{Ш_K}$ коммутационной шины $Ш_K$ становится равным потенциалу $U_{Ш_{K+}}$ шины $Ш_+$. Затем размыкается контактор K_+ , после чего опять одновременно напряжение верхнего конденсатора плавно повышается до U , а нижнего — обнуляется; далее размыкается контактор K_- , после чего схема управления плавно возвращает конденсаторы АДПН в исходное состояние. При вышеуказанных манипуляциях напряжение между шинами $Ш_-$ и $Ш_+$ остается постоянным (U), чем обеспечивается бесперебойное питание остальных нагрузок H_1 и H_2 . Для второго комплекта среднего звена АДПН (показан на рис. 7б пунктиром) могут быть применены искусственное заземление $Ш_K$ и фиксация потенциалов $Ш_+$ и $Ш_-$. Заметим, что роль АДПН может выполнять В-В-ККМ (на рис. 2) или ИСН_± (на рис. 3).

Проведем краткий сравнительный анализ вариантов распределительных систем КППН с СБР на базе АДПН (с АПОП и ППКШ). Воспользуемся сначала общими оценками их достоинств:

- бездуговое расцепление, а, возможно, и безыскровое замыкание контакторов при повышенном напряжении питания; применимость групповых контакторов и КК;
- отсутствие реактивной мощности;

- питание от подсистемы генерирования без стабилизации частоты и даже без стабилизации напряжения;
- простота параллельного объединения сетей;
- снижение коммутационных помех (способность плавной коммутации);
- обеспечение селективно-дифференциальной защиты;
- возможность относительно простого аккумуляторного резервирования с рекуперацией энергии и подпитки пиковых нагрузок;
- отсутствие продольных помех из-за петлевых контуров для \vec{H} -помех (по сравнению с однопроводными системами с использованием корпуса).

Затем оценим их общие недостатки в сравнении с классической двухпроводной СППН:

- удвоение числа контакторов и обеспечение временного сдвига при их расцеплении;
- наличие третьего провода;
- обязательность синхронизации АДПН с контакторами.

Наряду с этим нужно рассмотреть также дополнительные достоинства системы с АПОП по сравнению с СППН — применимость в тяговых транспортных электроприводах с сетевым однопроводно-заземленным питанием (железнодорожных, трамвайных и в мет-

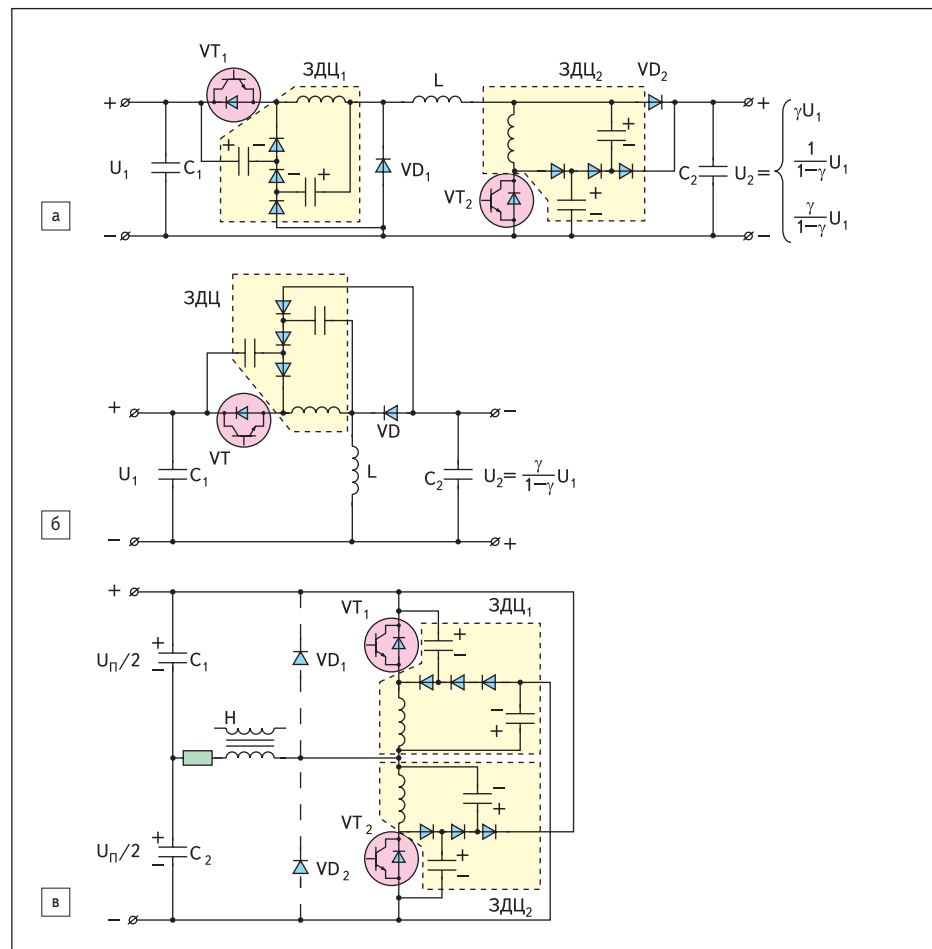


Рис. 8. Базовые импульсные преобразователи с защитно-демпфирующими цепочками (ЗДЦ): а) универсальный двухключевой конвертер; б) инвертирующий конвертер; в) полумостовой инвертор или АДПН

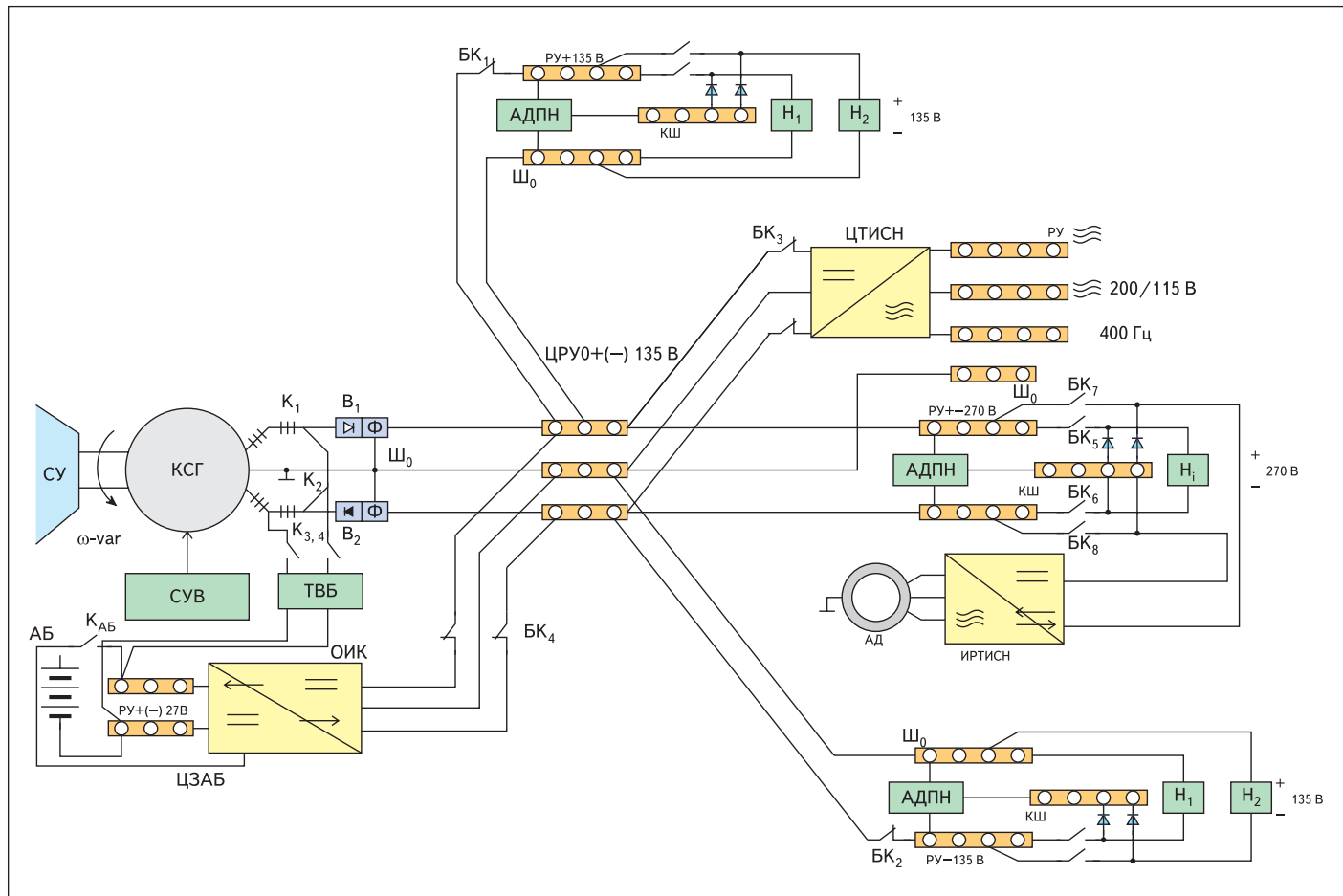


Рис. 9. Упрощенная структура комбинированной автономной системы энергоснабжения переменного (3-ф, 400 Гц, 200/115 В) и постоянных (± 27 В и 0 ± 135 В) напряжений с повышенным качеством электроэнергии и ЭМС

рополитене) и системы с ППКШ в сравнении с АПОП:

- необходимость регулирования только коммутируемой (одиночной) нагрузки и лишь на время коммутации;
- возможность подключения нагрузок с половинным напряжением со средней точкой (например, полумостовых инверторов);
- снижение вдвое постоянного рабочего напряжения изоляции для конденсаторов АДПН и проводов Ш_{1,2} относительно корпуса (интенсивности старения и вероятности пробоя);
- отсутствие силовых диодов в цепи постоянного питания нагрузок (есть импульсные диоды без радиаторов);
- простота параллельного объединения сетей (по шинам Ш_±);
- малое сечение третьего провода (коммутационного);
- возможность нагружения вторых средних звеньев АДПН только при несимметричных нагрузках половинным напряжением.

Целесообразно обратить внимание на существенную зависимость показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости (ЭМС), а также надежности показателей АСЭС от рациональной схе-

технической организации коммутационных процессов в многочисленных импульсно-ключевых преобразователях.

В [10] рассмотрен ряд пассивных защитно-демпфирующих цепочек, из которых наиболее надежной, простой и универсальной является 4-полюсная VD-L-C цепочка, обеспечивающая:

- а) мягкую коммутацию транзисторного ключа с минимальными потерями (отпирание при нулевом токе, а запираение при нулевом напряжении);
- б) защиту ключа и минимизацию помех di/dt , du/dt ;
- в) защиту ключей и диодов от паразитно-индуктивных перенапряжений, сквозных и инверсных сверхтоков.

На рис. 8 показаны базовые импульсные преобразователи с защитно-демпфирующими цепочками (ЗДЦ):

- а) универсальный двухключевой повышающе-понижающий конвертер;
- б) инвертирующий (обратноходовой) конвертер;
- в) полумостовой инвертор или АДПН.

Применение указанной защитно-демпфирующей цепочки может быть рекомендовано и для других импульсно-ключевых преобразователей.

КАСЭС переменного и постоянного тока с повышенным качеством электроэнергии и ЭМС на базе вентильных генераторов, схем бездугового расщепления и обратимых статических преобразователей

В соответствии с рассмотренными схемами бездугового расщепления (СБР) и схемами обратимых статических преобразователей упрощенная структура КАСЭС по варианту 3 может быть детализирована (рис. 9).

Обозначения на рис. 9: СУ — силовая установка; КСГ — каскадный синхронный генератор; СУВ — схема управления возбуждением; $K_{1,2,3,4}$ — контакторы переменного тока (шестифазные); $V_{1,2}-\Phi$ — выпрямители с выходными фильтрами; АДПН — коммутационный активный делитель постоянного напряжения с плавающим потенциалом; ЦТИСН — централизованный трехфазный инвертор синусоидального напряжения; ОИК — обратимый импульсный конвертер; ИРТИСН — индивидуальный регулируемый ТИСН с амплитудно-частотным управлением; АБ — аккумуляторная батарея; $H_{1,2,\dots,i}$ — индивидуальные нагрузки; АД — асинхрон-

ный двигатель с амплитудно-частотным управлением; ЦРУ — центральное распределительное устройство; РУ — периферийное распределительное устройство; КШ — коммутационная шина с плавающим потенциалом; Ш₀ — шина нулевого потенциала; КАБ — контактор аккумуляторной батареи; ЦЗАБ — цепь зарядки аккумуляторной батареи; ТВБ — трансформаторно-выпрямительный блок.

Помимо центрального распределительного устройства (ЦРУ 0 ± 135 В) с заземленным нулем система содержит пять периферийных распределительных устройств: РУ ± 270 В, РУ $+135$ В, РУ -135 В, РУ_н (200/115 В, 400 Гц) и РУ ± 27 В. Для исключения уравнивающих делителей напряжения (УДН на рис. 4) обмотка якоря каскадного синхронного генератора (КСГ) может быть выполнена 3-фазной по 3 пары секций в пазах каждой фазы ($\sqrt{3}w$, $w+w$), а выпрямители $V_{1,2}$ — по лучевой схеме. Бездуговое расцепление контакторов постоянного повышенного напряжения обеспечивается следующими алгоритмами:

- 1) Перед выключением бездуговых контакторов БК_{1,2} и БК_{3,4} предварительно выключаются соответствующие контакторы переменного тока К₁ и К₂.
- 2) Режим работы коммутирующих шин КШ: номинальный рабочий потенциал $\varphi = 0$ (для заземления диодной связи с отключенными нагрузками); при отключении произвольной нагрузки (Н₁): $\varphi \rightarrow +135$ В, выкл. БК₅, $\varphi \rightarrow -135$ В, выкл. БК₆, $\varphi \rightarrow 0$.

Централизованный и индивидуальные регулируемые по частоте и амплитуде трехфазные инверторы синусоидального напряжения (ЦТИСН и ИРТИСН), а также импульсный конвертор (ОИК) выполнены обратимыми. При рекуперативном торможении приводных электродвигателей в случае малой суммарной нагрузки на РУ 0 ± 135 В и РУ ± 270 В включается контактор аккумуляторной батареи (КАБ), и ОИК работает в форсированном зарядном режиме.

В заключение сформулируем основные достоинства последней рассмотренной системы:

1. Отсутствие привода постоянной частоты вращения (ППЧВ), то есть повышение надежности и КПД и снижение эксплуатационных расходов.
2. Полное и бездуговое гальваническое расцепление цепей нагрузки постоянного повышенного напряжения (ППН 0 ± 135 и ± 270 В).
3. Высокое качество электроэнергии и ЭМС каналов ППН (0 ± 135 и ± 270 В) благодаря 6- и 12-пульсному выпрямлению, возможности параллельного включения однотипных каналов, мягкой коммутации с плавающим потенциалом коммутирующей шины.
4. Взаимное резервирование всех каналов питания (РУ) и аккумуляторной батареи.
5. Быстродействие форсировки и расфорсировки возбуждения генератора (повышение качества централизованного питания) благодаря вращающемуся управляемому выпрямителю.
6. Надежность и повышенный ресурс изоляции обмоток, якоря генератора (минимум пазов, объединение секций, общее заземление) и проводов системы распределения ППН (минимум потенциала относительно заземления).
7. Возможность рекуперативного торможения приводных электродвигателей при любой загрузке сети.
8. Высокие надежность, качество выходных напряжений и параметров ЭМС трехфазных инверторов синусоидального напряжения (3-уровневое ШИМ-регулирование, снижение U_{VT} , dU/dt и dI/dt).

Литература

1. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов / Под ред. С. А. Грузкова. Том 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. М.: Издательство МЭИ, 2005.

2. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Булеков В. П., Резников С. Б. Электротехническая совместимость электрооборудования автономных систем. М.: Энергоатомиздат, 1995.
3. Резников С. Б. Самолетная система электроснабжения с распределенным преобразованием «переменная скорость — стабильная частота» // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 4.
4. Резников С. Б. Самолетная система электроснабжения квазипостоянного повышенного напряжения // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 4.
5. Войтович И. А., Коняхин С. Ф., Цишевский В. А. Современные статические преобразователи шкалы «Б» // Практическая силовая электроника. 2005. № 19.
6. Войтович И. А., Коняхин С. Ф., Цишевский В. А. Статические преобразователи систем электроснабжения летательных аппаратов // Силовая интеллектуальная электроника. 2005. № 1.
7. Коняхин С. Ф., Михеев В. В., Мыцык Г. С., Цишевский В. А. О новой возможности улучшения технических показателей трансформаторно-выпрямительных устройств с улучшенной электромагнитной совместимостью // Электрическое питание. Системы и источники вторичного электропитания и элементарная база для них: Сб. докл. научно-техн. конф. СПб., 2005. С. 45–58.
8. Коняхин С. Ф., Сенцов А. А., Мыцык Г. С. Трансформаторно-выпрямительное устройство с двухканальным преобразующим трактом и улучшенными характеристиками // Радиотехника, электроника и энергетика: Тез. докл. XI Международ. научно-техн. конф. студентов и аспирантов. Том 2. М.: МЭИ, 2005. С. 88–89.
9. Чибиркин В., Боок А., Завгородний В., Арикин О., Шестоперов П. Разработка трехфазного мостового инвертора для питания тяговых асинхронных электродвигателей электровозов постоянного тока // Силовая электроника. 2005. № 2.
10. Резников С., Чуев Д. Защита от сверхтоков и перенапряжений и снижение коммутационных потерь в силовых импульсных преобразователях // Компоненты и технологии. 2006. № 5.