

Импульсные вторичные источники питания

с повышенным качеством входных и выходных токов

Статья посвящена новым структурным и схемотехническим решениям для построения широко востребованных импульсных вторичных источников питания (ИВИП): AC/DC- и DC/DC-преобразователей, импульсных трансформаторно-выпрямительных устройств (ИТВУ) с высокочастотным инвертором, обратимых (двунаправленных) выпрямительно-инверторных импульсных преобразователей (ВИИП), автономных инверторов синусоидального напряжения (АИСН) и обратимых (двунаправленных) импульсных преобразователей частоты (ИПЧ). Рассмотрены средства для повышения качества потребляемых и выходных токов (коррекции коэффициентов мощностей), снижения коммутационных потерь и излучаемых помех, а также повышения надежности за счет демпфирования коммутационных сверхтоков и исключения нетермостойких и недолговечных электролитических фильтровых конденсаторов.

Работа представляется полезной для исследователей и разработчиков автономных и вторичных систем электроснабжения (СЭС), в частности — авиационно-бортовых, судовых, наземно-транспортных и стационарных ветро- и топливно-электроэнергетических установок (ВЭУ и ТЭУ).

Станислав Резников, д. т. н.

rezn41@mail.ru

Владимир Бочаров, к. т. н.

Игорь Харченко, к. т. н.

Юрий Ермилов

Андрей Лавринович

Импульсные DC/DC-преобразователи (конвертеры) с непрерывным входным током

В отличие от устаревшего понимания термина «конвертор» как «восстановитель» напряжения первоначального вида, но с измененными параметрами качества (переменного нестабильной частоты в переменное стабильной частоты или постоянного одного уровня в постоянное другого уровня), появившегося по аналогии со сталеплавильными конвертерами, к настоящему времени в силовой электронике установилось понимание данного термина как преобразователя постоянного или однополярно-пульсирующего (выпрямленного) напряжения в регулируемое знакопостоянное напряжение с улучшенными или специально заданными показателями качества.

В таблице, заимствованной из [1], приведены основные топологии классических импульсных преобразователей переменного однофазного напряжения в постоянное AC/DC, а также указаны базовые топологии их выходных DC/DC-преобразователей (конвертеров).

К ним можно добавить две более поздние структуры DC/DC- и AC/DC-преобразователей: резонансный LLC-преобразователь и безмостовой корректор коэффициента мощности (ККМ) [1].

На рис. 1а показана типовая блок-схема резонансного LLC-преобразователя. Преимуществами этой топологии являются благоприятные моменты переключения и, как следствие, сравнительно малые потери мощно-

Таблица. Основные топологии классических импульсных преобразователей напряжения

Базовая топология преобразователя	Упрощенная схема преобразователя
Понижающий (Buck)	
Повышающий (Boost)	
Понижающе-повышающий (Buck-Boost)	
Обратноходовой (Flyback)	
Прямоходовой (Forward)	
Cuk	
Sepic	
Zeta	

сти на силовых приборах, невысокий уровень и узкий спектр помех, что позволяет упростить фильтры и получить дополнительные проценты КПД. На рис. 1б показана упрощенная схема безмостового ККМ. За счет использования в выпрямителе вместо двух диодов «управляемых резисторов» на основе транзисторов MOSFET, в данной схеме, по сравнению с обычной топологией Boost PFC, уменьшаются потери мощности. Наиболее существенным недостатком топологии преобразователей, содержащих последовательный входной ключ, является прерывистый входной ток, который в случае построения AC/DC-преобразователя затрудняет обеспечение коррекции коэффициента потребляемой мощности.

На рис. 2 приведены модернизированные авторами схемы простейших конверторов с входным ключом, но с непрерывным входным током.

Схема классического повышающего конвертора (Boost) является наиболее простой и надежной, но требует обязательного превышения выходного напряжения над входным, что, как правило, вынуждает устанавливать на выходе энергоемкий, нетермостойкий и ненадежный электролитический конденсатор с относительно малым сроком службы.

Схема понижающего конвертора (Buck, рис. 2а) требует обязательного превышения входного напряжения над выходным, что делает ее непригодной для применения в сетевых ККМ.

Схема полярно-инвертирующего (обратноходового) конвертора с диодно-конденсаторным демпфированием силового ключа (рис. 2б) позволяет не только понижать или повышать выходное напряжение, но и, при желании, осуществить гальваническую развязку входа и выхода, применив вместо однообмоточного реактора (L_p) двухобмоточный трансреактор (Т-Л), т. е. двухобмоточный дроссель с общим магнитопроводом, имеющим антасыщающий зазор. К ее недостатку относится относительно низкий КПД.

Схема двухключевого понижающе-повышающего конвертора с диодно-конденсаторным шунтированием ключа также позволяет осуществлять понижение и повышение выходного напряжения, но с максимально возможным КПД для произвольного соотношения указанных напряжений. В режиме понижения напряжения второй ключ постоянно выключен, а первый модулирует, а в режиме повышения — первый постоянно включен, а второй модулирует. Возможен также третий режим — синхронной модуляции обоих ключей, при котором данная схема становится функционально-эквивалентной предыдущей, т. е. способной повышать и понижать напряжение в зависимости от коэффициента заполнения импульса (т. е. относительной длительности импульса $\Delta t_{\text{И}}/T_{\text{ШИМ}}$, где $T_{\text{ШИМ}}$ — период широтно-импульсной модуляции). При этом данная схема не инвертирует, а сохраняет полярность выходного потенциала относительно общего (заземленного) провода, что часто относится к преимуществам.

Рассмотренные схемы импульсных конверторов с непрерывным входным током

имеют не только самостоятельное значение, но и являются базисными для построения остальных преобразователей (ИТВУ, ВИИП, АИСН и ИПЧ).

ИТВУ с ЗВЧ, СБР и ККМ

Обычно в ИТВУ используются входной выпрямитель сетевого напряжения с ККМ, звено высокой частоты (ЗВЧ) с выходным

трансформаторно-выпрямительным блоком и индуктивно-емкостные фильтры выпрямленных напряжений, содержащие, как правило, энергоемкие электролитические буферные конденсаторы с низкими надежностью, термостойкостью и сроком службы. Их энергоемкость оценивается среднениклическими зарядом ($q_{\text{CP}} = CU_{\text{CP}}$) и энергией электрического поля ($W_{\text{CP}} = CU_{\text{CP}}^2/2$).

Исключить электролитические конденсаторы можно путем их замены на сглаживающий

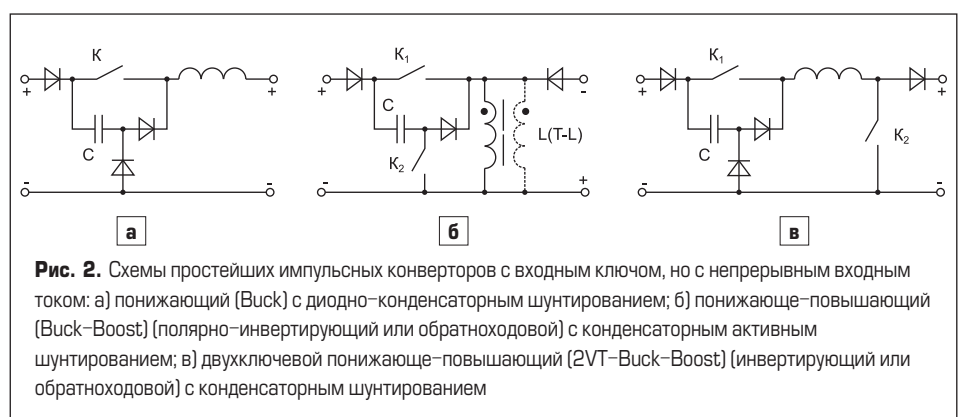
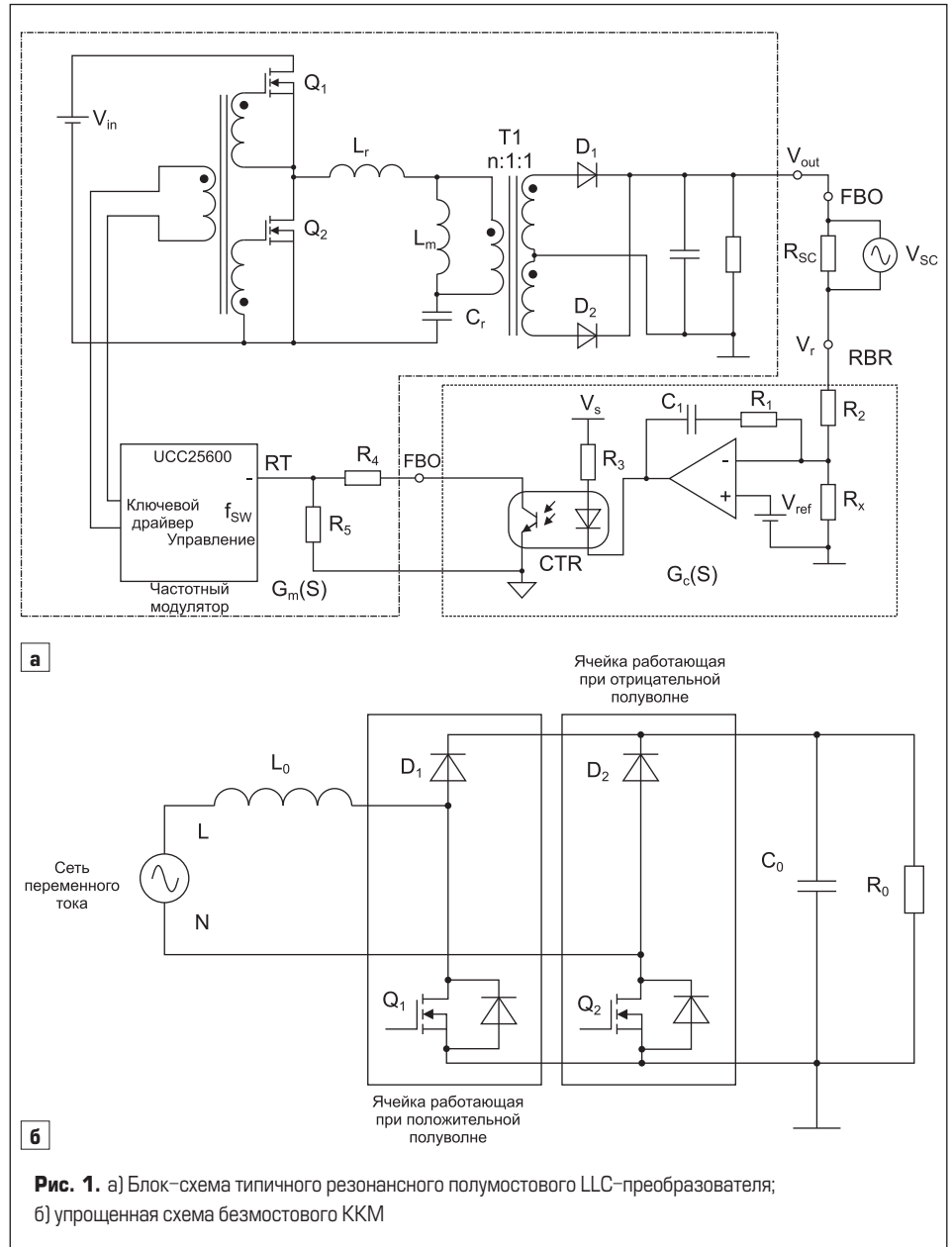


Рис. 2. Схемы простейших импульсных конверторов с входным ключом, но с непрерывным входным током: а) понижающий (Buck) с диодно-конденсаторным шунтированием; б) понижающе-повышающий (Buck-Boost) (полярно-инвертирующий или обратноходовой) с конденсаторным активным шунтированием; в) двухключевой понижающе-повышающий (2VT-Buck-Boost) (инвертирующий или обратноходовой) с конденсаторным шунтированием

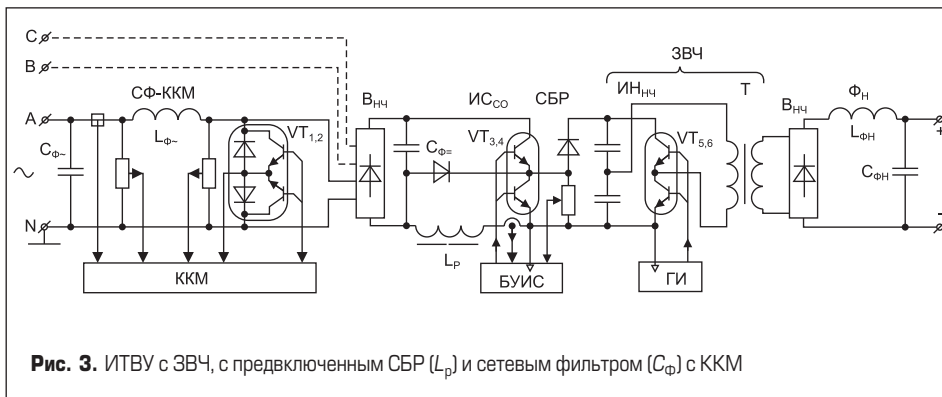


Рис. 3. ИТВУ с ЗВЧ, с предвключенным СБР (L_p) и сетевым фильтром (C_Φ) с ККМ

буферный реактор (СБР) с непрерывным током и существенными среднециклическими потокоосцеплением ($\Psi_{p,cp} = L_p I_{cp} = n \Phi_{cp}$) и электромагнитной энергией ($W_{p,cp} = L_p I_{cp}^2 / 2$).

Если в паузах между зарядными и разрядными дозами энергии буферный конденсатор остается отключенным от цепей (режим холостого хода), то в соответствии с дуальностью емкостно-индуктивных цепей буферный реактор должен оставаться замкнутым (режим короткого замыкания). Следует отметить, что наличие регулируемых указанных пауз необходимо для обеспечения статической устойчивости процессов импульсного регулирования (модуляции), например широтно-импульсной или частотной (ШИМ или ЧИМ).

На рис. 3 приведена принципиальная силовая схема ИТВУ с ЗВЧ (инвертором напряжения, ИН), предвключенным СБР с им-

пульсным стабилизатором (ИС) и входным сетевым фильтром (СФ) с ККМ.

ИТВУ (рис. 3) работает следующим образом. На входе блока управления ККМ имеются прямоугольные импульсы ШИМ, подаваемые на управляющие электроды электронного ключа переменного тока $VT_{1,2}$, входящего в состав корректора и обеспечивающего синусоидальную форму потребляемых из сети фазных токов, синхронизированных с соответствующими фазными напряжениями (для приближения коэффициента мощности к единице).

На входе низкочастотного выпрямителя $V_{НЧ}$ имеется существенно пульсирующее выпрямленное напряжение, частично сглаженное его выходным фильтровым конденсатором $C_{Ф=}$ и подводимое к входу ИС с СБР (L_p). На выходах блока управления ИС (БУИС) имеются прямоугольные парные импульсы с ШИМ, регулируемой по цепям обратных связей,

подаваемые на управляющие электроды электронно-ключевой стойки $VT_{5,6}$ и обеспечивающие ограничение среднеимпульсного значения тока реактора L_p , а также стабилизацию среднеимпульсного значения напряжения на входе полумостового инвертора напряжения высокой частоты $ИН_{ВЧ}$, коммутируемого генератором парных импульсов (ГИ).

При достаточной накопительной емкости реактора L_p , сохраняющего при корототке в междоузловых паузах накапливаемый ток (потокоосцепление) благодаря наличию цепей обратных связей, обеспечивается стабилизация напряжения на входе $ИН_{ВЧ}$, которая, в свою очередь, даже при нерегулируемом инверторе обеспечивает стабилизацию выходного напряжения на нагрузке, подключенной через индуктивно-емкостный фильтр Φ_H к выходу выпрямителя высокой частоты $V_{ВЧ}$.

К основным достоинствам ИТВУ (рис. 3) можно отнести следующие:

- используются три однотипные двухключевые транзисторные стойки MOSFET с напряжением 600 В;
- схема ККМ унифицирована по отношению к однофазной и трехфазной сетям;
- при установке СБР (L_p) на первичной (высоковольтной) стороне согласующего и развязывающего трансформатора Т сужаются по времени интервалы провалов пульсирующего выпрямленного напряжения, облегчая сглаживание пульсации потокоосцепления L_p ;
- при наличии трех независимых блоков управления проще реализовать цепи обратных связей по токам и напряжениям без развязывающих датчиков Холла, трансформаторов тока и оптопар.

На рис. 4 приведены структура и принципиальная силовая схема авиационно-бортовых расщепленно-модульных ИТВУ с циклоинверторным звеном высокой частоты (ЦИЗВЧ). Структура обладает пофазно-параллельным схемным и последовательно-временным коммутационным расщеплением. Она базируется на однофазных циклоинверторах высокой частоты с ККМ и управляемых ИТВУ с выходными СБР.

К достоинствам указанных расщепленно-модульных ИТВУ относятся:

- высокая функциональная надежность (резервирование), повышенная живучесть;
- унификация модулей с возможностью наращивания суммарной мощности;
- минимизация коммутационных помех и повышение частоты помехоизлучения, упрощающие их подавление;
- высокий коэффициент потребляемой мощности, т. е. снижение тепловых потерь и потерь напряжения и повышение коэффициента использования установочной мощности первичных источников и преобразователей (снижение общей «полетной массы»);
- исключение нетермостойких, ненадежных и недолговечных сглаживающих буферных электролитических конденсаторов;
- минимальная масса согласующих и развязывающих высокочастотных трансформаторов;

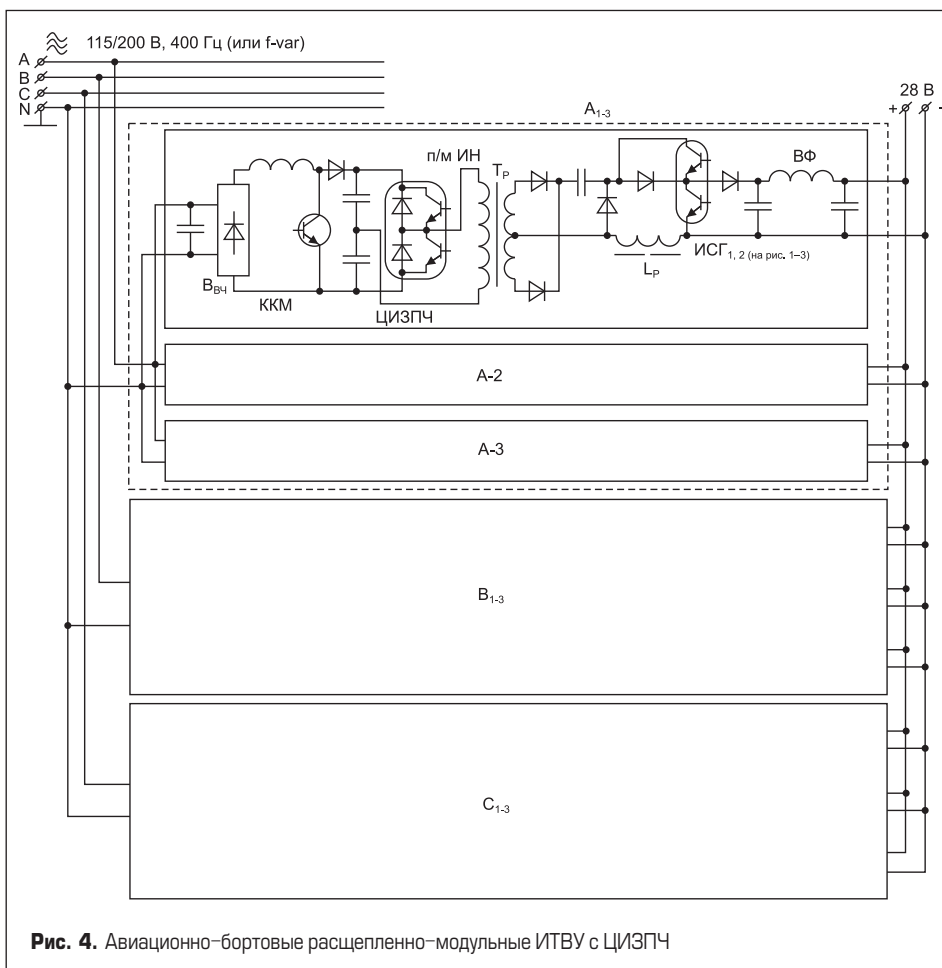


Рис. 4. Авиационно-бортовые расщепленно-модульные ИТВУ с ЦИЗВЧ

- отсутствие асимметричных насыщений магнитопроводов трансформаторов, вызывающих сверхтоки, тепловые потери и помехоизлучения;
- не критичность к стабильности сетевой частоты;
- обеспечение внешней характеристики «источника тока», упрощающей зарядку аккумуляторных батарей и накопительных конденсаторов, а также питание светодиодных и газоразрядных светильников;
- гибкость реализации питания групповых нагрузок с заданной степенью децентрализации и расщепления;
- рациональное использование существующей номенклатуры малогабаритных высокочастотных элементов (MOSFET, ферритовых сердечников и др.);
- высокая степень ремонтпригодности и эксплуатационной экономичности;
- обеспечение высокого качества выходной электроэнергии и сохранения качества питающей электроэнергии;
- удобство для поэтапного преимущества внедрения комбинированных автономных СЭС переменного-постоянного тока с подсистемой распределения повышенного постоянного напряжения (СППН 0 ± 135 В).

Импульсные модулирующие циклоконверторы

Традиционно под циклоконверторами (ЦК) понимаются тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью, т. е. без про-

межуточного фильтрового звена постоянного напряжения (конденсаторного) или постоянного тока (реакторного) [2, 3]. Принцип действия классического циклоконвертора связан с однократным преобразованием электроэнергии переменного тока нестабильной (обычно повышенной) частоты в электроэнергию переменного тока постоянной частоты (например, 400 или 50 Гц) путем циклического разнополярного выпрямления переменного тока с амплитудной (или фазовой) модуляцией средневыпрямленного напряжения.

По сравнению с преобразователем частоты (ПЧ) с промежуточным реакторным звеном постоянного тока (L_p), ЦК отличается более высоким КПД, лучшими массо-габаритными параметрами (при том же качестве выходного напряжения) и возможностью общего заземления сетевых нейтралей (рис. 1).

Однако общим недостатком ЦК и ПЧ с L_p является плохое качество входного и выходного тока, а именно — низкое значение коэффициента потребляемой мощности и высокое значение коэффициента нелинейных искажений (гармоник) выходного тока. Следствием этого являются низкий общий КПД преобразования (из-за больших тепловых потерь в цепях первичной и вторичной сетей), большие массо-габаритные показатели выходных фильтров и первичного источника питания и большая помехоэмиссия (плохие параметры ЭМС).

В отличие от указанного традиционного (более раннего) понимания термина «конвертор» как «восстановителя того же вида,

но с измененными параметрами качества», в данной работе используется более позднее и более узкое толкование в силовой электронике этого термина, а именно — преобразователь постоянного напряжения в постоянное (шире: постоянного или однополярно-пульсирующего напряжения в аналогичное, но с другими параметрами качества).

В указанном выше контексте широкого толкования термина «конвертор» под импульсным модулирующим циклоконвертором (ИМЦК) понимается импульсный конвертор с циклически повторяющимся законом высокочастотной широтно-импульсной модуляции постоянного или выпрямленного пульсирующего питающего напряжения (с синусоидальной огибающей) с последующей реакторной демодуляцией и коммутацией полярностей для выделения низкочастотной синусоидальной огибающей — выходного тока.

Для реализации указанных процессов в составе автономных инверторов и преобразователей частоты используются рассмотренные выше модулирующие импульсные конверторы, а также рассматриваемые ниже реакторные демодуляторы и коммутаторы полярности выходного тока.

Реактивные демодуляторы с коммутацией полярности выходного тока в составе автономных инверторов

На рис. 5 приведены структуры автономных инверторов синусоидального тока (АИСТ) с понижающим импульсным модулирующим конвертором (ИМК), реактивным демодулятором (РДМ) и коммутатором полярности (КП) выходного тока: а) с последовательным предвключенным реактором (L_p) и мостовым КП; б) с параллельным обратногоходовым реактором (трансреактором) ($L_p, T-L_p$) и мостовым КП; в) с общим заземлением средних точек входного емкостного фильтра, шунтирующей электронно-ключевой стойки и параллельного обратногоходового трансреактора ($T-L_p$) и с полумостовым КП; г) с комбинированным последовательно-параллельным трансреактором ($T-L_p$), с общим заземлением средних точек входного емкостного фильтра, шунтирующей электронно-ключевой стойки и выходного вывода и с двунаправленным КП; д) с последовательным предвключенным реактором (L_p), трансформаторным инвертором прямоугольного тока (ИПТ) повышенной частоты и двунаправленным КП со средней точкой; е) с комбинированным последовательно-параллельным трансреактором ($T-L_p$), трансформаторным (автотрансформаторным) ИПТ повышенной частоты и двунаправленным КП со средней точкой.

Первая структура (рис. 5а) реализует преобразование с максимальным КПД при произвольном соотношении входных и выходных напряжений. Транзисторы $VT_{1,2}$ двухключевой электронной стойки КП не только участвуют в коммутации полярности вместе с тиристорами $VS_{1,2}$, но и подключают к ИМК реактор L_p для накопления в нем электромаг-

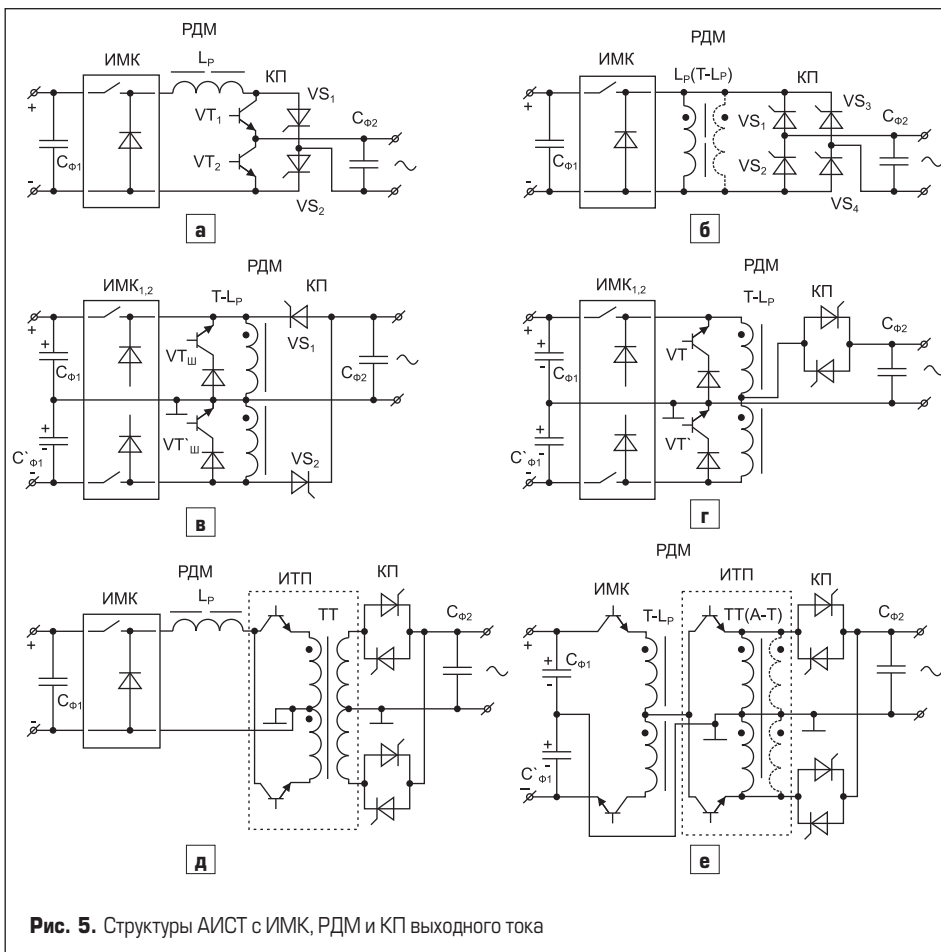


Рис. 5. Структуры АИСТ с ИМК, РДМ и КП выходного тока

нитной энергии (бустерный режим), которая может быть зафиксирована и временно сохранена путем одновременного включения VT_1 и VT_2 . ИМК и КП в совокупности с реакторным звеном синусно-пульсирующего знакопостоянного тока и выходным конденсаторным фильтром ($C_{\Phi 2}$) представляют собой аналог классического регулируемого инвертора тока, но не тиристорного, «ведомого сетью», а автономного инвертора синусоидального напряжения (АИСН).

Структура на рис. 5б имеет более низкий КПД, но зато обеспечивает лучшее согласование источника и нагрузки по напряжению, а при трансреакторе ($T-L_p$) также их гальваническую развязку, что является важным аспектом ЭМС и электробезопасности. Здесь также возможна фиксация и временное сохранение электромагнитной энергии реактора (трансреактора) путем включения одной из тиристорных стоек КП.

Структура на рис. 5в имеет общее заземление входа и выхода, что является существенным преимуществом при реализации многофазных преобразователей частоты с непосредственной связью, рассматриваемых ниже.

Четвертая из приведенных структур (рис. 5г) также имеет общее заземление входа и выхода и поэтому пригодна для реализации многофазных ПЧ. Ее КПД выше, чем у предыдущей, за счет прямоходового непосредственного преобразования при совпадении полярностей напряжений на входе и выходе.

Последние две структуры, помимо последовательного реактора (рис. 5д) или комбинированного последовательно-параллельного трансреактора (рис. 5е), содержат трансформаторный (автотрансформаторный) ИПТ повышенной частоты. Обе структуры имеют относительно низкий КПД из-за каскадного двойного преобразования энергии (с модуляцией и демодуляцией в каждом), но удобны для согласования сети с нагрузкой по напряжению и в аспекте электробезопасности (например, для сварочного аппарата или низковольтного светодиодного светильника).

ПЧ с промежуточной импульсной модуляцией

Важнейшей задачей ПЧ является обеспечение двунаправленности потока преобразуемой мощности (обратимость преобразования), диктуемое:

- реактивными составляющими тока в цепях нагрузки;
- способностью питания электроприводных двигателей с рекуперативным торможением;
- обеспечением стартерного режима для автономного синхронного генератора, питающего первичную сеть;
- необходимостью межсетевое резервирования питания.

Первые две из перечисленных задач характерны также и для АИСН, питаемых от химических источников постоянного тока или от выпрямленных устройств с энергоемким емкостным электролитическим фильтром.

Выполнение функции обратного преобразования энергии не обязательно должно сопровождаться коррекцией коэффициента мощности, потребляемой от нагрузки или от вторичной сети. Поэтому входной ток обратного питания может быть и прерывистым.

Отметим, что все структуры автономных инверторов, приведенные на рис. 5, в принципе способны обеспечить обратное преобразование мощности при соответствующем изменении алгоритма управления.

Одним из наглядных примеров реализации структуры ПЧ с промежуточной импульсной модуляцией является схема однофазного ПЧ на базе РДМ с пульсирующим однонаправленным током, представленная на рис. 6а. Она содержит: сетевой фильтр с повышающим корректором коэффициента мощности (СФ-ККМ), два идентичных мостовых обратимых управляемых выпрямителя/коммутатора полярности (УВ/КП и КП/УВ), понижающе-повышающие импульсные модулирующие конвертеры (ИМК_{1,2}) и РДМ. На рис. 6б приведены временные диаграммы токов в первичной и вторичной сетях (i_1, i_2) и в цепи реактора (I_p), а также напряжений первичной сети (u_1) и выпрямленного (u_d). В схеме СФ-ККМ применен диодно-транзисторный ключ переменного тока с высокочастотной ШИМ, обеспечивающий коэффициент потребляемой из первичной сети мощности, близкий к единице. Блоки УВ/КП и КП/УВ имеют синхронное управление без фазового запаздывания (без регулирования). Моменты включения транзисторов ИМК₁ и ИМК₂ синхронизированы с моментами включения транзисторов

РДМ. При этом ШИМ среднего значения тока реактора (L_p) производится за счет изменения коэффициента заполнения γ_1 импульсов ИМК₁ (или ИМК₂), а регулирование выходных токов при прямом и обратном преобразовании — за счет аналогичного коэффициента γ_2 транзисторов РДМ.

Следует, однако, отметить два существенных недостатка рассмотренной схемы:

- большое количество электронных ключей (18 шт.) и, соответственно, тепловых потерь в них, что снижает КПД и надежность схемы и требует дополнительных массогабаритных затрат на теплоотвод;
- отсутствие общего для входа и выхода заземленного (нулевого) вывода, что сильно затрудняет реализацию многофазности структуры.

Многофазные преобразователи частоты с промежуточной импульсной модуляцией

На базе рассмотренной схемы однофазного ПЧ (рис. 6а) может быть реализована схема многофазного ПЧ (МПЧ) с промежуточной импульсной модуляцией, представленная одним из межфазных каналов А-а на рис. 7, в которой применен трансреакторный демодулятор (ТРДМ) с двумя взаимноиндуктивно-связанными обмотками (с индуктивностями L_1 и L_2), имеющими коэффициент взаимной индукции (M) и коэффициент связи $K_{св} = M/\sqrt{L_1 L_2}$ близкий к единице. Помимо ТРДМ, схема содержит сетевой фильтр с повышающим ККМ (СФ-ККМ), два идентич-

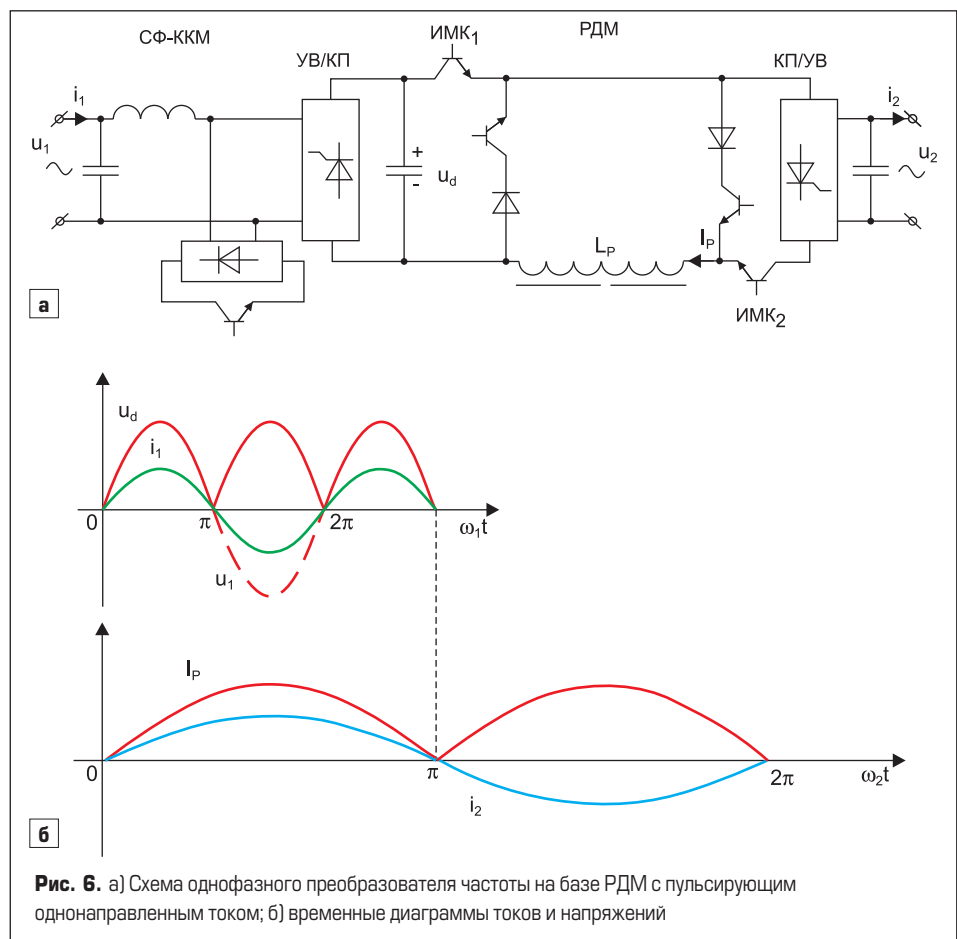


Рис. 6. а) Схема однофазного преобразователя частоты на базе РДМ с пульсирующим однонаправленным током; б) временные диаграммы токов и напряжений

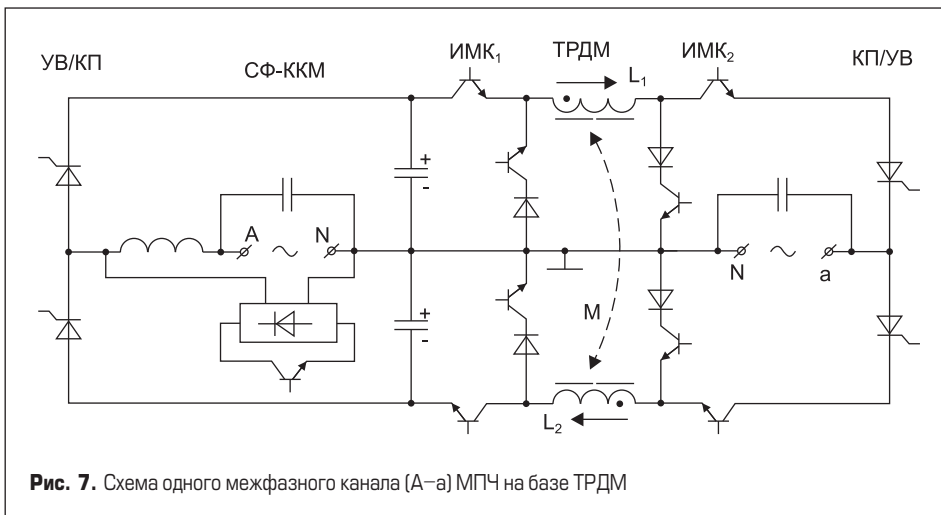


Рис. 7. Схема одного межфазного канала (А-а) МПЧ на базе ТРДМ

ных обратимых управляемых выпрямителя/коммутатора полярности (УВ/КП и КП/УВ) и два импульсных модулирующих конвертора (ИМК_{1,2}).

С учетом рассмотрения схемы ОПЧ (рис. 6а) работа данной схемы не нуждается в подробных пояснениях. Отметим лишь ее способность перебрасывать (скачкообразно) токи из одной обмотки трансреактора L₁-L₂ в другую в соответствии с электротехническим законом непрерывности суммарного потокоцепления взаимно индуктивно-связанных обмоток. К существенному недостатку данной схемы также относится большое число полупроводниковых ключей (13 шт.) и связанное с этим ухудшение надежностных и массо-энергетических показателей, перечисленных выше.

Схемы ОПЧ и МПЧ, представленные на рис. 6а и 7, соответствуют структуре автономного инвертора, показанной на рис. 5г, имеющей в принципе повышенный КПД за счет прямоходового непосредственного преобразования при совпадении полярностей напряжений на входе и выходе. Однако, как уже было сказано выше, это достоинство структуры (рис. 5г) нивелируется большим числом ключей.

На рис. 8 приведены два варианта схем одного из межфазных каналов многофазного ПЧ, соответствующие структурам АМ, показанным на рис. 5в и 5г. В них использованы два однотипных понижающих импульсных конвертора тока (ИКТ) с диодно-конденсаторным активным шунтированием (демпфированием C_д) модулирующих ключей (VT₁ и VT_{1'}). ИКТ выполняют функции: импульсного высокочастотного амплитудного модулятора пульсирующего выпрямленного напряжения с низкочастотной синусоидальной огибающей; корректора коэффициента потребляемой мощности; регулятора амплитуды выходного тока и напряжения выходного емкостного фильтра (C_{ф2}).

В первом варианте (рис. 8а) ИКТ-ККМ всегда работает в режиме понижения напряжения, так как параллельный трансреактор (Т-Л_р) закорочен транзисторами (VT₁ и VT_{1'}), имеющими ток, превышающий ток дросселя (L), а трансреактор всегда работает в обратном режиме, отдавая свою электро-

магнитную энергию в нагрузку (вторичную сеть A₂N) через полумостовой коммутатор полярности тока (VS₂ и VS_{2'}).

Во втором варианте схемы (рис. 8б) во временных интервалах, в которых выпрямленное питающее напряжение превышает напряжение нагрузки (U_п > U_н), ИКТ также работает в режиме понижения. Однако при этом энергия источника питания дросселя (L) непосредственно передается в нагрузку по цепи A₁-VD₁-VT₁-L-W(Т-Л_р)-VS-A₂-N (или N-A₂-VS-W/(Т-Л_р)-L'-VT₁'-VD₁'-A₁), причем с высоким КПД. Во временных интервалах, в которых U_п < U_н, ИКТ вместе с Т-Л_р работает в режиме прямоходового повышения (в бустерном режиме), сначала ток (потокоцепление) Т-Л_р нарастает по цепи A₁-VD₁-VT₁-L-W, W/(Т-Л_р)-VT₂'-N (или по аналогичной цепи от N_кA₁), а затем спадает по вышеуказанной цепи нагрузки через выходной двунаправленный ключ (VS и VS') согласно электротехническому закону о непрерывности суммарного потокоцепления взаимно индуктивно-связанных цепей.

Для лучшего понимания принципа работы обоих вариантов схем перечислим функции их основных элементов, учитывая, что задачи и функции основных узлов (ИКТ-ККМ) и ТРДМ описаны выше.

Функции шунтирующих ключей (VT₂ и VT_{2'}):

- обеспечение цепи для накопления и сохранения в межимпульсных и сетевых паузах тока (электромагнитной энергии) трансреактора (Т-Л_р) путем их раздельного или одновременного включения;
- коммутация полярности тока нагрузки совместно с вентилями VS₂ и VS_{2'};
- обеспечение цепи частичной разрядки шунтирующих конденсаторов С и С' на дроссели L, L' и Т-Л_р для последующей передачи в нагрузку накопленных ими доз энергии в межимпульсных паузах.

Функции шунтирующих конденсаторов С и С' с их зарядно-разрядными цепями:

- защита транзисторов VT₁ и VT_{1'} ИКТ-ККМ от коммутационных перенапряжений;
- обеспечение непрерывности входного сетевого тока для повышения коэффициента потребляемой мощности;
- снижение помехоэмиссии, связанной с наличием коммутационно-кондуктивных помех типа dU_{VТ}/dt.

Функции входного (индуктивно-емкостного) и выходного (емкостного) фильтров L_ф-C_{ф1} и C_{ф2} — улучшение показателей ЭМС, а именно: сохранение синусоидальной формы входного тока и выходного напряжения и двустороннее помехоподавление. При определенном соотношении параметров входной фильтр может служить пассивным ККМ [3-5].

Для обеспечения обратного питания необходимо, чтобы коммутирующие вентили VS₂ и VS_{2'} (рис. 8) были запираемыми. В качестве таких вентилей можно применить транзисторы или двухоперационные (запираемые по управлению) тиристоры, способные ра-

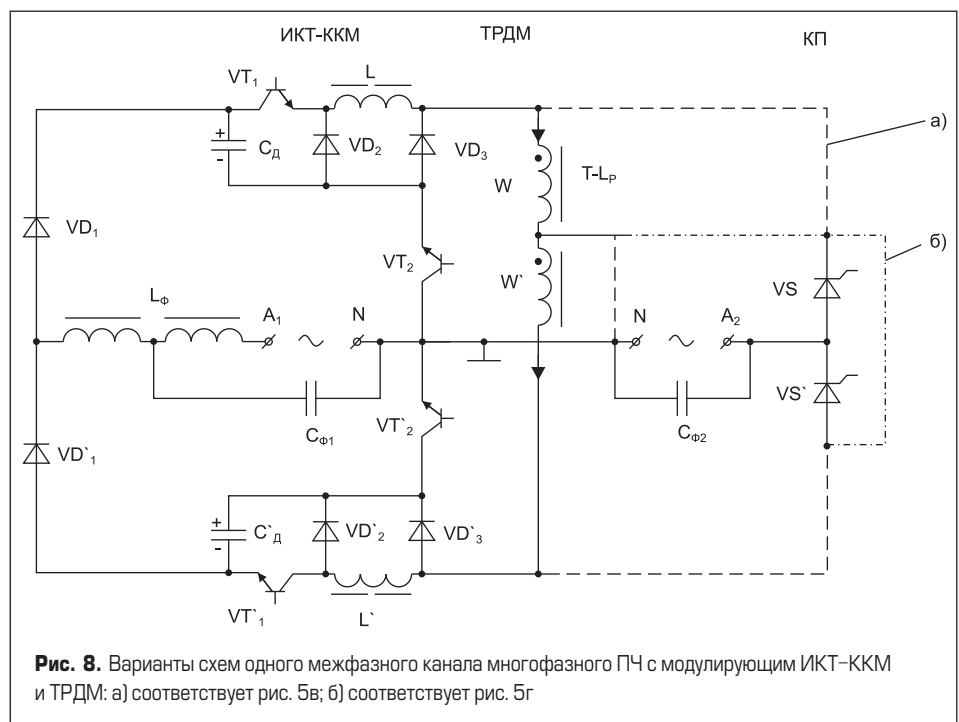


Рис. 8. Варианты схем одного межфазного канала многофазного ПЧ с модулирующим ИКТ-ККМ и ТРДМ: а) соответствует рис. 5в; б) соответствует рис. 5г

ботать в режиме высокочастотной широтно-импульсной модуляции.

При обратном питании задачей вентилей VS_2 и VS_2' совместно с ключами VT_2 и VT_2' является накопление и сохранение среднечастотного потока энергии (электромагнитной энергии) трансреактора Т- L_p . При этом могут рассматриваться два варианта:

- потокосцепление Т- L модулируется по закону однополярно пульсирующей синусоиды $\Psi(t) = \Psi_0 \sin \omega_1 t$, где $\omega_1 = 2\pi f_1$ — циклическая частота напряжения первичной сети;
- потокосцепление поддерживается постоянным, что вполне подходит для автономных инверторов с входным энергоемким емкостным фильтром или аккумуляторной батареей.

Для ИМЦК первый вариант предпочтителен, так как обеспечивает сохранение качества электроэнергии (форму напряжения) первичной сети, не вводя в ее цепь высшие гармоники тока.

Передача электромагнитной энергии Т- L_p в первичную сеть производится путем синхронно-противофазной высокочастотной коммутации ключевых пар VT_1 и VT_2 (VT_1' и VT_2'). При этом демпфирующие конденсаторы C_d и C_d' играют роль сглаживающих фильтров и защищают запираемые ключи от перенапряжений.

Рассмотренные варианты схем МПЧ имеют один и тот же состав элементов силовой части и близки по уровню сложности алгоритмов

управления. Однако следует отметить, что второй вариант схемы (рис. 8б) обеспечивает более высокий КПД за счет возможности прямоходового режима работы трансреактора на временных интервалах, когда напряжение питания превышает напряжение нагрузки и когда совпадают полярности потенциалов на входных и выходных фазных выводах (A_1 и A_2). Кроме того, в этой схеме вместо встречно-параллельных тиристоров VS и VS' можно применить ключ переменного тока в виде диодного моста, зашунтированного транзистором.

В заключение можно констатировать повышенную надежность предложенных устройств за счет исключения нетермостойких и недолговечных электролитических конденсаторов и достаточно высокий уровень электромагнитной и электроэнергетической совместимости предложенных схем ИВИП (AC/DC- и DC/DC-преобразователей, ИТВУ, АИЧН, ИПЧ с промежуточной импульсной модуляцией тока), а именно — высокое качество питающего тока (в частности, значение коэффициента мощности) и выходного синусоидального тока (напряжения), а также низкий уровень помехоэмиссии.

Рассмотренные структуры и схемотехнические решения представляются полезными для исследователей и разработчиков автономных и вторичных СЭС, в частности — авиационно-бортовых, судовых и наземно-транспортных, а также ветро- и топливно-энергетических.

Литература

1. Самоделов А., Игнатов С. Источники питания с цифровым управлением // Силовая электроника. 2012. № 2.
2. Электрооборудование летательных аппаратов: уч. для вузов. М.: Изд-во МЭИ. 2005. Т. 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов.
3. Джюджи Л. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты. Теория, характеристики, применение / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1983.
4. Пат. (РФ) на полезную модель № 99667. Преобразователь переменного напряжения в постоянное // С. Б. Резников, С. Ф. Коняхин, В. В. Бочаров // Бюл. № 32. 2010.
5. Резников С. Б., Гуренков Н., Бочаров В. В., Коняхин С. Ф. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость вторичных источников импульсного питания с автономными системами электроснабжения переменного тока. Ч. 5. Моделирование индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) с выпрямительно-емкостной нагрузкой в составе однокаскадных и двухкаскадных ВММП // Силовая электроника. 2010. № 3.
6. Резников С. Б., Бочаров В. В., Кириллов В. Ю., Постников В. А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость транспортного электрооборудования с высоковольтными цепями питания. М.: МАИ-ПРИНТ. 2010.