

Резервно-аккумуляторные источники бесперебойного питания

для автономных и сетевых систем электроснабжения со звеном постоянного повышенного напряжения

Рассматриваются защищенные приоритетом РФ нетрадиционные схемотехнические решения для резервно-аккумуляторных (или на базе суперконденсаторов) источников бесперебойного питания (ИБП), обеспечивающих двунаправленное взаимодействие резервной низковольтной аккумуляторной (или ионисторной) батареи с автономной или сетевой системой электроснабжения (СЭС), в частности — со звеном постоянного повышенного напряжения (ЗППН). Первое решение базируется на обратимом (зарядно-разрядном) импульсном конвертере (ОИК) с прямо-/обратноходовым трансреактором и нерассеивающим демпферно-снабберным узлом. Второе — на высокочастотном трансформаторном инвертере прямоугольного тока (ТИПТ) с выходным циклоконвертером (ЦК). Оба решения обеспечивают надежность, высокий КПД, малые помехоизлучения, а также гальваническую развязку входа и выхода с возможностью их общего заземления. Указаны области их рационального применения. Статья представляет интерес для разработчиков транспортных СЭС, стационарных автономных и сетевых, включая ветровые, дизельные, солнечные, прибойно-береговые и другие электростанции, электромобильных (электробусных), а также авиационно-бортовых СЭС, в частности — перспективных полностью электрифицированных самолетов (ПЭС) и беспилотных летательных аппаратов (ЛА).

Станислав Резников,
д. т. н.

Светлана Климова

Игорь Харченко, к. т. н.

Валерий Смирнов, к. т. н.

Валерий Савостьянов

Введение

Резервно-аккумуляторные источники бесперебойного питания (ИБП) можно разделить по функциональному назначению на две группы [1–6]:

- с выходным постоянным повышенным напряжением (ППН) для аварийного питания соответствующего звена (ЗППН) — униполярного (например, ± 270 В, ± 540 В для авиабортовых СЭС) или дифференциального, со среднепотенциальным выводом (например, (0 ± 135) В, (0 ± 270) В);
- с выходным однофазным или трехфазным переменным напряжением стабильной частоты (например, 115/200 В, 400 Гц для авиабортовых СЭС или 220/380 В, 50 Гц для общепромышленных СЭС).

При этом ИБП второй группы, как правило, способны также выполнять функцию питания

ЗППН. Они часто имеют двухкаскадную структуру, включающую в себя ИБП первой группы с выходным ЗППН и двунаправленный инверторно-выпрямительный преобразователь (ДИВП). У такой структуры относительно более низкий КПД из-за двукратного преобразования, чем у трансформаторных инверторов синусоидального низкочастотного повышенного напряжения, имеющих как низковольтное питание с трехфазным или тремя однофазными низкочастотными трансформаторами, так и с промежуточным высоковольтным трансформаторным инвертором прямоугольного напряжения (лучше — тока) и выходным циклоконвертером (например, тиристорным или симисторным).

Обе группы ИБП в последние десятилетия получают все более широкое распространение

в транспортных СЭС, стационарных автономных и сетевых, включая ветровые, дизельные, солнечные, прибойно-береговые и другие электростанции, электромобильных (электробусных) СЭС, а также авиационно-бортовых, в частности — перспективных полностью электрифицированных самолетов (ПЭС) и беспилотных ЛА. Поэтому ужесточаются требования к КПД, надежности и удельной мощности резервно-аккумуляторных ИБП, обеспечивающих двунаправленное взаимодействие резервной низковольтной аккумуляторной (и/или суперконденсаторной (ионисторной)) батареи с СЭС, имеющей ЗППН.

Таким образом, рассмотрение ИБП обеих указанных групп представляется весьма актуальным.

Основные решаемые проблемы

К основным проблемам, стоящим перед разработчиками представленных ИБП, относятся:

- создание гальванической развязки входа и выхода, позволяющей унифицировать схему относительно униполярного и дифференциального ЗППН и использовать их общее заземление и повышающей электробезопасность;
- обеспечение высокого КПД с учетом как соизмеримости падения напряжения на силовых полупроводниковых ключах и диодах со значительным напряжением аккумуляторной батареи (особенно на ключах с относительно высоким рабочим напряжением, которое определяется выходным напряжением в схемах без трансформаторов), так и больших коммутационных потерь в ключах при их «жесткой» коммутации (при ненулевых токах и напряжениях);
- снижение помехоизлучений из-за «жесткой» коммутации;
- исключение «сквозных» и «диодно-инверсных» сверхтоков, которые возникают из-за безындуктивной разрядки емкостных фильтров через несанкционированно включенные последовательные ключи (например, при электромагнитном импульсе молнии) или диодно-ключевые стойки (на интервалах восстановления электрической прочности предварительно проводивших диодов) и существенно снижают функциональную надежность;
- осуществление защиты ключей от перенапряжений, возникающих из-за больших индуктивностей рассеяния трансформаторных и трансреакторных обмоток;
- необходимость антинасыщающего симметрирования вольсекундных параметров (произведений или интегралов) разнополярных импульсов, питающих двухтактные трансформаторы инверторов напряжений или альтернативные решения на базе трансреакторов и трансформаторов тока;

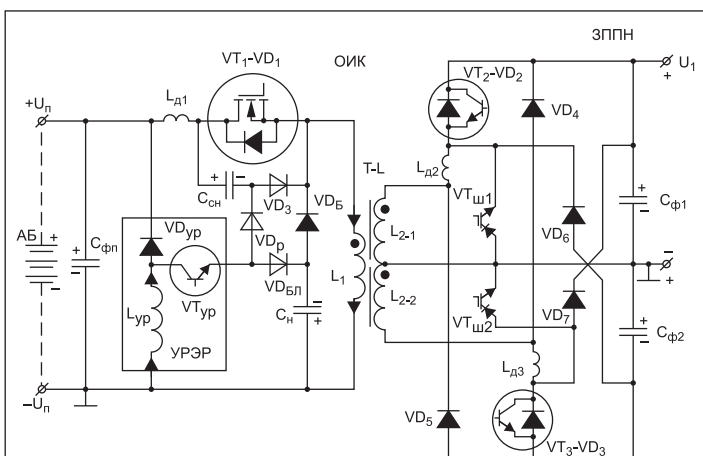


Рис. 1. Силовая схема резервно-аккумуляторного ИБП для СЭС с ЗППН (униполярным или дифференциальным) на базе обратимого импульсного конвертора (ОИК) с прямо-/обратноходовым трансреактором (Т–L), узлом рекуперации энергии рассеяния (УРЭР) и нерассеивающим демпферно-снабберным узлом (L_д–С_{сн}).

- обеспечение режима обратного преобразования электроэнергии (режима зарядки аккумуляторной батареи), а также активного (безынерционного и точного) выравнивания напряжений в плечах дифференциального ЗППН и амплитуд переменных фазных напряжений.

Удовлетворение всех перечисленных требований представляется нетривиальной задачей.

Описание силовой схемы ИБП для СЭС с ЗППН и ее работы

На рис. 1 представлена силовая схема предлагаемого резервно-аккумуляторного ИБП для СЭС с униполярным или дифференциальным ЗППН на базе обратимого импульсного конвертора (ОИК) с прямо-/обратноходовым трансреактором (Т–L), узлом рекуперации энергии рассеяния Т–L (УРЭР) и нерассеивающим демпферно-снабберным узлом L_д–С_{сн}.

Для прямого направления преобразования электроэнергии (от АБ с напряжением U_п к ЗППН с напряжениями 0 ± U_{1,2}) ОИК представляет собой одноконтурный трансреакторный широтно-импульсный высокочастотный модулятор на базе полевого транзисторного ключа VT₁–VD₁ (MOSFET) и выходного дифференциального выпрямителя на базе четырехдиодного мостового выпрямителя VD_{2–5} и двухконденсаторной фильтровой стойки C_{ф1,2}.

Энергия, накапливаемая индуктивностью рассеяния первичной обмотки L₁ трансреактора Т–L при нарастании его полного потокосцепления с током в цепи C_{фп}–VT₁–L₁–C_{фп}, передается после очередного выключения ключа VT₁ накопительному конденсатору C_н с током через блокирующий диод VD_б, а затем через УРЭР (по сути — полярно-инвертирующий импульсный конвертор) возвращается в C_{фп}. Высокий КПД в этом режиме обеспечивается за счет относительно малого сопротивления канала полевого транзистора VT₁, за счет его «мягкой» коммутации, определяемой демпферно-снабберным узлом L_д–С_{сн}, за счет сочетания прямо- и обратноходовой трансформации тока и за счет не рассеивающей тепла рекуперации энергий, накапливаемых в индуктивности рассеяния обмотки L₁, в L_д, C_{сн}, а также за счет согласования знакопеременных напряжений на обмотках трансреактора Т–L при нарастаниях и спадах его полного потокосцепления, то есть за счет исключения игольчато-импульсных токов зарядки C_{ф1,2}.

Приблизительное выравнивание абсолютных величин напряжений U₁ и U₂ фильтровой стойки C_{ф1,2} в этом режиме обеспечивается за счет симметрии и высокого коэффициента связи секций L₂₋₁ и L₂₋₂ (с катушкой в два провода). Снабберный конденсатор C_{сн} заряжается при выключении ключа VT₁ через демпферный дроссель L_д, а разряжается на первичную обмотку L₁ трансреактора и на дозатворный дроссель L_{уп} по цепи: C_{сн}–VT₁–L₁–L_{уп}–VT_{уп}–C_{сн}, возвращая накопленную энергию через них в выходные и во входной фильтровые конденсаторы.

Для обратного преобразования электроэнергии от C_{ф1,2} к C_{фп} второй и третий модуляторные ключи VT₂ и VT₃ также управляются высокочастотными широтно-импульсными прямоугольными импульсами (либо синхронно, либо поочередно). При этом часть энергии вторичного источника питания (ЗППН) передается в C_{фп} и АБ на первом (нечетном) этапе за счет «прямоходовой» трансформации тока, а затем — в накопительный конденсатор C_н (и далее — через УРЭР) за счет «обратноходовой» (дозаторной) трансформации тока.

Для повышения КПД и снижения помехоизлучений описанную схему можно использовать в двухтактном варианте. На рис. 2 приведена силовая схема ИБП для дифференциального ЗППН на базе двухтактного обратноходового обратимого импульсного конвертора (ОИК) с двумя трансреакторами Т–L_{1,2} и общим узлом рекуперации энергии рассеяния (УРЭР). Демпферно-снабберные узлы на схеме не показаны (они аналогичны описанным).

Для рационального использования двухтактной схемы целесообразно регулировать коэффициент заполнения импульса в периоде широтно-импульсной модуляции t_н = γ_н/0,5T_{шим} вблизи

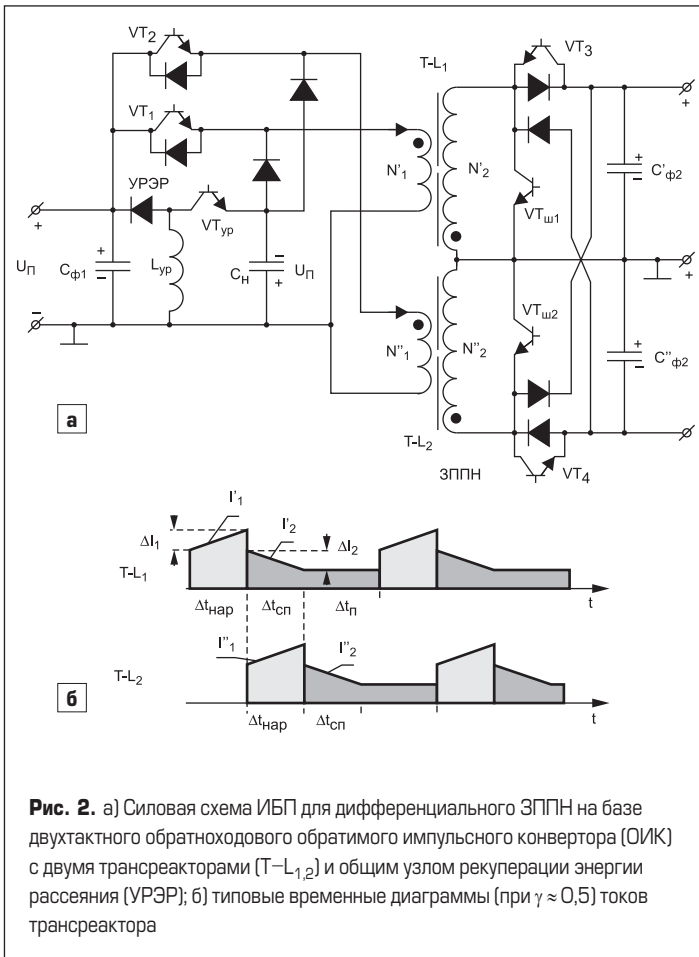


Рис. 2. а) Силовая схема ИБП для дифференциального ЗППН на базе двухтактного обратногоходового обратимого импульсного конвертора (ОИИК) с двумя трансреакторами (Т-L_{1,2}) и общим узлом рекуперации энергии рассеяния (УРЭР); б) типовые временные диаграммы (при γ ≈ 0,5) токов трансреактора

среднего значения: $\gamma_{cp} = 0,5$. При таком значении величины γ и его малых приращений не связаны с коэффициентом трансформации трансреактора. Действительно, когда не учитываются активные сопротивления обмоток и «идеальный» коэффициент их электромагнитной связи $K_{св} = M / \sqrt{L_1 L_2} = 1$, равенство $\gamma = 0,5$ в случае

отсутствия токозамыкающей паузы означает соотношение между интервалами нарастания и убывания полного потокосцепления трансреактора:

$$\frac{\gamma}{1-\gamma} = \frac{\Delta t_{нар}}{\Delta t_{сп}} = \frac{\Delta I_1 \times \frac{L_1}{U_n}}{\Delta I_2 \times \frac{L_2}{U_2}} = \frac{\Delta I_1}{\Delta I_2} \times \frac{U_2}{U_n} \times \frac{N_1^2}{N_2^2} = \frac{K_{тр} \times K_{тр}}{K_{тр}^2} = 1.$$

Схема на рис. 2 имеет более высокий КПД вследствие снижения (и даже исключения) пауз в потребляемом и выходном (суммарном) токе. При этом обе схемы позволяют активно выравнять напряжения в плечах дифференциального ЗППН.

Существенное повышение КПД при прямом (основном) преобразовании в схемах на рис. 1 и 2 может быть достигнуто введением кратковременных токозамыкающих пауз (на рис. 2 — с токами в цепях: $N'_2 - VT_{ш1} - N'_2$ и $N''_2 - VT_{ш2} - N''_2$) перед очередными выключениями ключей $VT_{1,2}$, благодаря чему исключается доза электромагнитной энергии трансреактора, возвращаемой в накопительный конденсатор C_n и определяющей внутреннюю реактивную мощность схемы. Заметим, что при введении шунтирующих ключей $VT_{ш1,2}$ первая схема (рис. 1) получает существенное преимущество перед второй (рис. 2) по надежности, поскольку во второй, под воздействием на блок управления электромагнитных импульсов молний, появляются две цепи для «сквозных сверхтоков» при несанкционированных одновременных включениях ключей VT_3 и $VT_{ш1}$ или VT_4 и $VT_{ш2}$. Поэтому представляется рациональным сочетать левую часть второй схемы и правую часть первой (по отношению к трансреактору).

Дальнейшее повышение КПД, а главное, обеспечение питанием нагрузок переменного тока, можно реализовать с помощью двухтактных трансформаторных схем (с трансформатором тока — ТТ, не требующим антинасыщающего симметрирования вольт-секундных параметров питающих импульсов).

Описание силовой схемы ИБП для комбинированных СЭС переменного-постоянного тока и ее работы

На рис. 3 представлена силовая схема резервно-аккумуляторного ИБП для комбинированных СЭС переменного-постоянного тока (СЭС~) на базе трансформаторного звена высокой частоты (инвертора прямоугольного тока — ТИПТ) с выходным циклоконвертором (ЦК) и накопительно-демодуляторным реактором ($L_{н/д}$). В этой схеме использован предложенный авторами ранее нетрадиционный способ формирования низкочастотного синусоидального тока/напряжения [1]. Он заключается в импульсном формировании в накопительно-демодуляторном реакторе однополярного модульно-синусопульсирующего с низкой частотой потокосцепления (тока) по закону $\psi(t) = \psi_0 \times |\sin(\omega t)|$. Благодаря этому после периодической коммутации тока реактора на выходе преобразователя формируется синусоидальный ток (а на емкостном фильтре — напряжение). Для получения трехфазного напряжения к входным выводам подключается второй аналогичный преобразователь с выходным напряжением, сдвинутым относительно первого на фазовый угол $2\pi/3$. Подавая оба эти напряжения на два конденсатора (из трех) емкостного фильтра по схеме «треугольник», можно получить трехфазную систему линейных напряжений, а при схеме «звезда» — фазных напряжений с искусственной нейтралью.

Помимо ТИПТ с трансформатором тока (ТТ) и двухтактным импульсным модулятором $VT_1 - VT_2$, схема содержит накопительный конденсатор C_n и устройство рекуперации энергии рассеяния УРЭР, аналогичные вышеописанным, шунтирующий электронный ключ $VT_{ш}$, две управляемые двухвентильные (тиристорные) стойки $VS_1 - VS_2$ и $VS_3 - VS_4$. Модуляторные ключи $VT_{1,2}$ зашунтированы обратными диодами $VD_{1,2}$ (внутренними — как в MOSFET-ключях — или внешними) и снабжены — наряду с двумя другими ключами — демпферно-снабберными узлами $L_d - C_{сн}$.

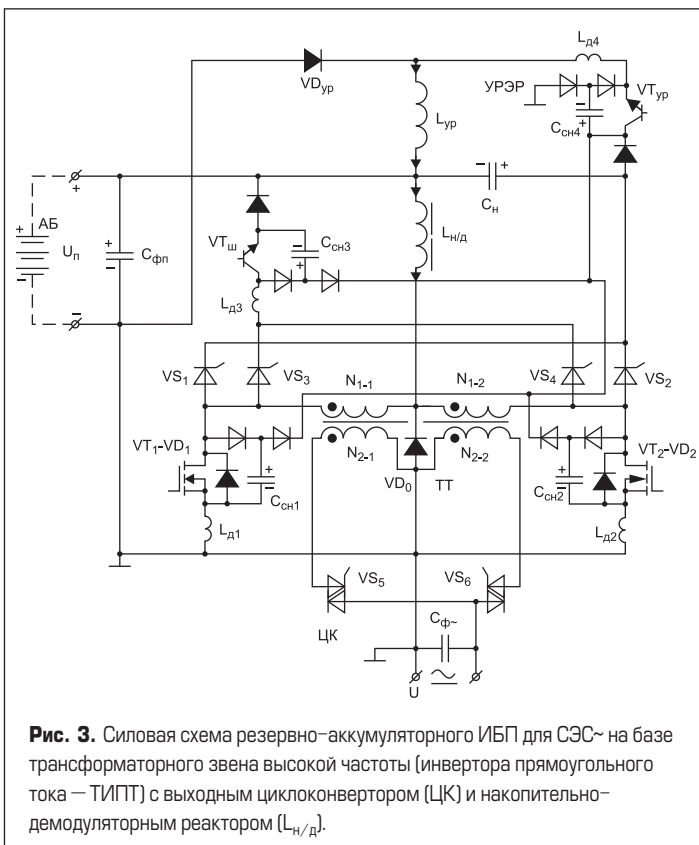


Рис. 3. Силовая схема резервно-аккумуляторного ИБП для СЭС~ на базе трансформаторного звена высокой частоты (инвертора прямоугольного тока — ТИПТ) с выходным циклоконвертором (ЦК) и накопительно-демодуляторным реактором ($L_{н/д}$).

Отличительной особенностью ТИПТ на базе трансформатора тока (ТТ), в отличие от традиционных инверторов напряжения, является исключение насыщения магнитопровода ТТ независимо от несимметрии форм разнополярных питающих импульсов, что является его существенным преимуществом.

Вентили $VS_{1,2}$, накопительный конденсатор $C_{\text{н}}$ и УРЭР служат для защиты ключей $VT_{1,2}$ от коммутационных перенапряжений из-за ЭДС самоиндукции индуктивностей рассеяния первичных обмоток N_{1-1} , N_{1-2} ТТ и рекуперации их электромагнитной энергии обратно во входной фильтр питания $C_{\text{фп}}$.

Вентили $VS_{3,4}$ и шунтирующий ключ $VT_{\text{ш}}$ служат для организации токозамыкающих пауз с сохранением потокоцепления $L_{\text{н/д}}$, обеспечивающих взаимонезависимое (дуальное) управление амплитудой и формой потокоцепления $L_{\text{н/д}}$, а следовательно, и выходного тока циклоконвертера (ЦК).

Зарядка аккумуляторной батареи (АБ) от сети переменного тока сопровождается поочередным включением симисторов VS_5 – VS_6 циклоконвертера (ЦК) в соответствии с полупериодами переменного напряжения на $C_{\text{ф}}$ в моменты времени, близкие к моментам его обнуления. Это предохраняет магнитопровод ТТ от насыщения при обратном преобразовании энергии. Роль выпрямителя для зарядного тока в этом режиме играют вентили VS_1 , VS_2 и диод VD_0 .

Сравнение вариантов ИБП и области их применения

Оба рассмотренных варианта ИБП (трансреакторный и трансформаторный) удовлетворяют всем критериальным требованиям, перечисленным выше:

- имеют гальваническую развязку входа и выхода (униполярного или дифференциального) с возможностью их общего заземления;
- обеспечивают высокий КПД за счет использования в низковольтной цепи всего одного транзисторного ключа (в первой схеме) или двух параллельных ключей (во второй схеме) с относительно малым рабочим напряжением (менее 100 В), а также за счет «мягкой» коммутации, благодаря нерассеивающим демпферно-снабберным узлам;
- имеют малые помехоизлучения благодаря той же «мягкой» коммутации;
- не имеют цепей, существенно снижающих функциональную надежность, кроме схемы, приведенной на рис. 2 для «сквозных» и «диодно-инверсных» сверхтоков;
- исключают коммутационные перенапряжения на модуляторных ключах, благодаря рекуперации электромагнитной энергии индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора (трансреактора) и использованию снабберных конденсаторов;
- не нуждаются в устройствах антинасыщающего симметрирования параметров знакопеременных питающих импульсов трансформатора, что также повышает надежность устройств;
- являются двунаправленными, то есть обеспечивают режим зарядки аккумуляторной батареи, а также активное (безынерционное и точное) выравнивание напряжений в плечах дифференциального ЗППН и амплитуд переменных фазных напряжений.

Массо-энергетические показатели и показатели надежности, а также параметры ЭМС и качества выходной электроэнергии рассмотренных вариантов ИБП представляются приблизительно равнозначными. Однако области их рационального применения существенно различаются.

Областью рационального применения первой схемы ИБП (на базе ОИК с трансреактором) являются системы электроснабжения со звеном постоянного повышенного напряжения (СЭС со ЗППН), преимущественно — с дифференциальным (например, (0 ± 270) В, (0 ± 135) В, (0 ± 380) В), а также с униполярным (± 270 В, (0 ± 380) В, ± 540 В). В первом случае предпочтительно заземление среднотенциального («нулевого») вывода, а во втором — «минусового». В указанных СЭС канал переменного трехфазного напряжения (115/200 В, 400 Гц или 220/380 (230/400) В, 50 Гц) питается от ЗППН через двунаправленный инверторно-выпрямительный преобразователь с инвертором синусоидального напряжения (ДИВП-ИСН) [1]. Основное предназначение двунаправленности указанных преобразователей заключается, наряду с зарядкой аккумуляторной батареи от сети переменного тока, в обе-

спечении режимов рекуперативного торможения электроприводов переменного тока (с асинхронными или синхронными электродвигателями).

Трансформаторную схему ИБП (на базе ТИПТ с ЦК) целесообразно применять как в вышеприведенных СЭС с униполярным ЗППН, так и в СЭС переменного трех- или однофазного тока. Однако следует отметить, что режим обратного преобразования электроэнергии в этой схеме предполагает относительно малую мощность, достаточную для зарядки аккумуляторной батареи, но недостаточную для рекуперации энергии мощных электроприводов, требующей отдельного выпрямительного или трансформаторно-выпрямительного, со звеном высокой частоты, преобразователя.

Модернизированная трансформаторная схема ИБП

Схема, приведенная на рис. 3, может быть несколько упрощена. На рис. 4 показаны альтернативный вариант силовой схемы ИБП от резервно-аккумуляторной батареи (рис. 4а) или суперконденсаторов (ионисторов), а также фрагменты временных диаграмм (рис. 4б). В этом варианте вместо второй двухвентильной стойки VS_3 – VS_4 установлен блокирующий диод $VD_{\text{БЛ}}$. На временных диаграммах «огibaющей» высокочастотного напряжения секций N'_1 и N''_1 первичной обмотки N_1 трансформатора тока (ТТ) в низкочастотном масштабе (ωt) и тока накопительно-демодуляторного реактора $L_{\text{н/д}}$ в высокочастотном масштабе (t) на которых выделены интервалы режимов работы:

- с понижением напряжения;
 - с повышением напряжения, что определяется соотношением между напряжением питания $U_{\text{АБ}} = 27$ В и напряжением указанной «огibaющей» $U'_{N'_1}(t)$, $U''_{N''_1}(t)$.
- На второй из диаграмм заштрихованы этапы с токами нагрузки $I_{\text{н}}$, приведенными к первичной обмотке трансформатора тока (N_1) для произвольных выбранных полупериодов широтно-импульсной модуляции $0,5T_{\text{ШИМ}}$ в режимах понижения и повышения напряжения.

Цепями токов в указанных режимах являются:

- в режиме понижения напряжения на этапах:
 - $dI/dt > 0$ — цепь АБ– $L_{\text{н/д}}$ – N'_1 – VT_1 –АБ;

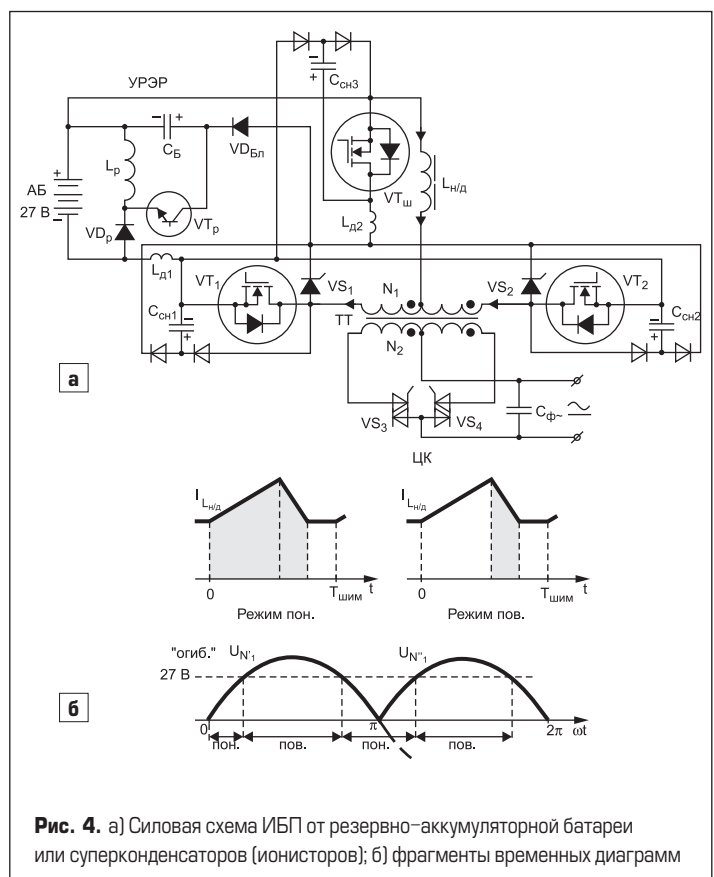


Рис. 4. а) Силовая схема ИБП от резервно-аккумуляторной батареи или суперконденсаторов (ионисторов); б) фрагменты временных диаграмм

- $di/dt < 0$ — цепь $L_{нд} - N'_1 - VS_1 - VT_{ш} - L_{нд}$;
- $di/dt \approx 0$ — цепь $L_{нд} - (N'_1 - VS_1) // (N''_1 - VS_2) - VT_{ш} - L_{нд}$;
- в режиме повышения напряжения на этапах:
 - $di/dt > 0$ — цепь $AB - L_{нд} - (N'_1 - VT_1) // (N''_1 - VT_2) - AB$;
 - $di/dt < 0$ — цепь $L_{нд} - N'_1 - VT_1 - AB - L_{нд}$ и $L_{S2} - VS_2 - VD_{БЛ} - C_{Б} - L_{нд} - L_{S2}$, где L_{S2} — индуктивность рассеяния второй секции первичной обмотки трансформатора ($N_1 TT$);
 - $di/dt \approx 0$ — цепь $L_{нд} - (N'_1 - VS_1) // (N''_1 - VS_2) - VT_{ш} - L_{нд}$.

Снабберные конденсаторы $C_{СН1,2,3}$ нерассеивающих демпферно-снабберных цепочек (ДСЦ), обеспечивающих «мягкую» коммутацию ключей, заряжаются через демпферные дроссели $L_{д1,2}$, а разряжаются на $L_{нд}$ по следующим цепям: $C_{СН1} - VT_{ш} - L_{нд} - N'_1 - VT_1 - C_{СН1}$; $C_{СН2} - VT_{ш} - L_{нд} - N''_1 - VT_2 - C_{СН1}$; $C_{СН3} - VT_{ш} - L_{нд} - (N'_1 - VT_1) // (N''_1 - VT_2) - C_{СН3}$.

В заключение напомним основные достоинства обоих вариантов схем ИБП от АБ (трансформаторного и трансформаторного):

- высокий КПД (и небольшие размеры радиаторов) благодаря единственному полупроводниковому каналу (или двум параллельным каналам) в цепи нарастания тока и малым статическим потерям в цепях сохранения (в паузах) и спада тока, а также за счет рекуперации энергии рассеяния через узел УРЭР, чередования энергоэкономичных режимов понижения и повышения напряжения с неразрывным одним из внешних токов и «мягкой» коммутации с использованием нерассеивающих демпферно-снабберных цепочек (ДСЦ);
- высокое качество выходной электроэнергии благодаря созданию синусоидальной «огibaющей» тока в накопительно-демпферном реакторе ($L_{нд}$) и безынерционности переключения режимов

прямого и обратного преобразования (отсутствие реверса полного потокоцепления реактора);

- обеспечение устойчивой параллельной работы преобразовательных модулей благодаря формированию внешней вольт-амперной характеристики источника тока при реализации модульно-масштабируемой архитектуры;
- отсутствие необходимости в устройстве антинасыщающего симметрирования вольт-секундных параметров разнополярных импульсов напряжения для трансформатора тока (ТТ);
- гальваническая развязка внешних выводов с их общим заземлением, благодаря чему допускается трехфазное исполнение (причем на базе двух преобразователей);
- обеспечение обратимости преобразования для зарядки аккумуляторной батареи в штатном режиме;
- применимость для питания сетей переменного тока, а также униполярных и дифференциальных звеньев постоянного повышенного напряжения (270, 540 В).

Заключение

Предлагаемые нетрадиционные схемотехнические решения для источников бесперебойного питания, как резервно-аккумуляторных, так и выполненных на базе суперконденсаторов, предназначены для автономных или сетевых систем электропитания (СЭС), в частности имеющих звено постоянного повышенного напряжения (ЗППН), обеспечивают высокую надежность, большой КПД, малые помехоизлучения и гальваническую развязку входа и выхода с возможностью их общего заземления. Указаны области рационального применения двух предложенных вариантов ИБП: на базе обратимого импульсного конвертора (ОИК) с трансреактором и на базе транс-

форматорного инвертора прямоугольного тока (ТИПТ) с циклоконвертором. Решения защищены приоритетом РФ [7, 8].

Литература

1. Резников С. Б., Бочаров В. В., Харченко И. А. Электромагнитная и электроэнергетическая совместимость систем электроснабжения и вторичных источников питания полностью электрифицированных самолетов / Под ред. С. Б. Резникова. М.: Изд-во МАИ. 2014. 160 с.
2. Ганьшин А., Мелешин В., Скачков С., Жикленков Д. Вспомогательный преобразователь на основе IGBT-модулей 65 класса, работающий от контактной сети 3 кВ // Силовая электроника. 2015. № 5.
3. Климов В. Организация параллельной работы источников бесперебойного питания переменного тока // Силовая электроника. 2008. № 2.
4. Гончаров А., Твердов И. Источники бесперебойного питания фирмы «Александр Электрик» промышленного и специального назначения // Силовая электроника. 2004. № 1.
5. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Ч. 1 // Силовая электроника. 2007. № 4. Ч. 2. 2008. № 1.
6. Электрический самолет. А. В. Левин, С. М. Мусин, С. А. Харитонов, К. Л. Ковалев, А. А. Герасин, С. П. Халютин / Под ред. С. М. Мусина. Уфа: Уфимский гос. авиац.-техн. ун-т (УГАТУ). 2014.
7. Трансформаторный инвертор / С. Б. Резников, В. В. Бочаров, А. В. Лавринович, А. Б. Корнилов, Н. П. Черкашина // Патент на полезную модель № 145994. Бюл. № 27 от 27.09.2014.
8. Резников С. Б., Бочаров В. В., Лавринович А. В., Харченко И. А. Обратимый преобразователь частоты // Патент на полезную модель № 137693. Бюл. № 6 от 27.02.2014.