Импульсные регуляторы амплитуды

с коррекцией формы переменного напряжения для транспортных и стационарных электроэнергосистем

Рассмотрены структуры и схемы импульсных регуляторов амплитуды с коррекцией формы переменного напряжения на базе непосредственных или трансформаторных обратимых циклоконверторов с повторением частоты. В качестве примеров возможного широкого применения в области электроники подробно рассмотрены системы бесперебойного питания и блок обеспечения электробезопасности и согласования.

Станислав Резников, д. т. н.

rezn@formatek.ru

Игорь Соловьев, к. т. н.

Николай Гуренков

Совершенствование силовых IGBT и MOSFET-транзисторов позволяет широко внедрять различные схемы импульсных регуляторов амплитуды с коррекцией формы переменного напряжения (ИРА-КФ), называемые также дискретными стабилизаторами и формирователями переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием [1–3]. По сути, такие устройства можно отнести к обратимым циклоконверторам с повторением частоты и активной фильтрацией основной гармоники. Однако термин «циклоконвертор» исторически закрепился за преобразователями высокой частоты в низкую путем амплитудной или широтной модуляции с последующей демодуляцией. Указанные разночтения понятия «циклоконвертор» соответствуют изменению определения для термина «конвертор», под которым когда-то понимался преобразователь переменного напряжения в постоянное (обобщенный выпрямитель), а в последние десятилетия — преобразователь постоянного напряжения в постоянное.

Применение ИРА-КФ может быть весьма широким:

- системы бесперебойного питания [4];
- стабилизаторы амплитуды и формы переменного напряжения для нагрузок с высоким качеством питающей электроэнергии;
- корректоры коэффициента мощности сети, активные фильтры и компенсаторы;
- устройства согласования синхронных (синфазных) сетей;
- выходные регуляторы и стабилизаторы для магнитоэлектрических генераторов (МЭГ) с приводом постоянной частоты вращения (ППЧВ);
- блоки обеспечения электробезопасности и согласования (обобщенные трансформаторы с промежуточным высокочастотным звеном);
- регуляторы скорости электродвигателей переменного тока с кодо-импульсным амплитудно-частотным разгоном и стабилизацией скорости и др.

Основной трудностью реализации ИРА-КФ является обеспечение обратимости преобразования, необходимой для питания реактивных нагрузок или согласования синхронных (синфазных) сетей. Обобщенная структура ИРА-КФ, обеспечивающая указанное обратимое преобразование, показана на рис. 1, где обозначены: М — модулятор, ДМ — демодулятор, Тр — трансформатор (автотрансформатор), ШИР — широтно-импульсный регулятор. Структура может быть и бестрансформаторной, то есть с непосредственным преобразованием. Вход и выход могут иметь или не иметь общую точку, например нейтраль трехфазной сети.

В качестве наиболее характерного примера применения ИРА-КФ рассмотрим системы бесперебойного питания.

Традиционная структура системы бесперебойного питания переменного тока включает в себя выпрямитель с импульсным корректором коэффициента мощности, емкостный сглаживающий фильтр, аккумуляторную батарею, инвертор с синусоидальным напряжением и низкочастотный фильтр переменного тока.

К основным недостаткам указанной структуры относятся:

- двойное преобразование энергии;
- необратимость направления преобразования (неприемлемость для рекуперативного торможения электроприводов, для взаимосвязи каналов питания и т. п.);

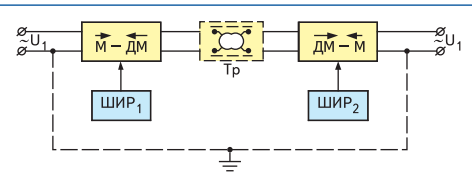

Рис. 1. Обобщенная структура ИРА–КФ

- высокая энергоемкость сглаживающего конденсатора;
  - сложность обеспечения синусоидальности выходного напряжения без громоздких низкочастотных фильтров;
  - как правило, наличие высоковольтной аккумуляторной батареи;
  - трудность обеспечения общей точки входа-выхода (например, заземленной) и реализации трехфазного исполнения с заземленной нейтралью.

Авторами предлагаются две структуры систем бесперебойного питания, свободные от указанных недостатков и основанные на оригинальных схемах импульсных обратимых непосредственных или трансформаторных конвертеров (ОНЦ или ОТЦ).

На рис. 2а показан осесимметричный вариант структуры многомодуляторного ОНЦ, подключенного к вершинам емкостного треугольного фильтра (с относительно малыми емкостями конденсаторов) [4].

Данный ОНЦ способен работать в одном из трех режимов:

1) обратимое преобразование $U_1 \leftrightarrow U_2$ или $U_2 \leftrightarrow U_3$ с нулевым или 180-градусным фазовым сдвигом;
2) обратимое преобразование $U_1 \leftrightarrow U_3$ со 180-градусным фазовым сдвигом (со сменой полярности);
3) вольтдобавочное (вольтвычитающее) обратимое преобразование $U_1 \leftrightarrow \pm\Delta U_2 \leftrightarrow U_3$ с нулевым фазовым сдвигом.

Последний (вольтдобавочный) режим представляется наиболее энергоэкономичным при выполнении функции стабилизации напряжения, а первый — при питании от аккумуляторной батареи.

На рис. 2б приведен пример осциллограмм напряжений, соответствующий этому режиму.

При появлении на первой полуволне питающего напряжения U_1 положительного отклонения (всплеска) $\Delta U = U_1 - U_3$ относительно заданной синусоиды U_3 необходимо на вольтдобавочном конденсаторе C2 сформировать противонапряжение $\Delta U_2 = -\Delta U$. Для этого в течение каждого периода широтно-импульсного модуля сначала включаются электронные ключи $ЭК_1$ и $ЭК_5$, происходит нарастание тока в дросселе L, затем вместо указанных ключей включаются ключи $ЭК_2$ и $ЭК_3$, и ток дросселя спадает при подзарядке C2. Указанные циклы периодически повторяются (с относительно высокой частотой) с управляемой по обратной связи относительной длительностью γ по закону $\Delta U_2 = \gamma U_1/(1-\gamma)$ (в случае непрерывного тока в дросселе). После прохода вершины всплеска для снижения величины в течение каждого периода широтно-импульсного модуля ΔU_2 сначала включаются $ЭК_2$ и $ЭК_3$, а затем вместо $ЭК_3$ включается $ЭК_5$, после чего подзаряжается C3.

При появлении на первой полуволне U_1 отрицательного отклонения (провала) ΔU необходимо на C2 сформировать вольтдобавку $\Delta U_2 = \Delta U$.

Для этого в течение периода ШИМ сначала включаются $ЭК_1$ и $ЭК_5$, а затем вместо $ЭК_5$ — $ЭК_1$ и т. д. Для снижения величины ΔU_2 в течение того же периода сначала включаются $ЭК_1$ и $ЭК_5$, а затем вместо них — $ЭК_2$ и $ЭК_5$.

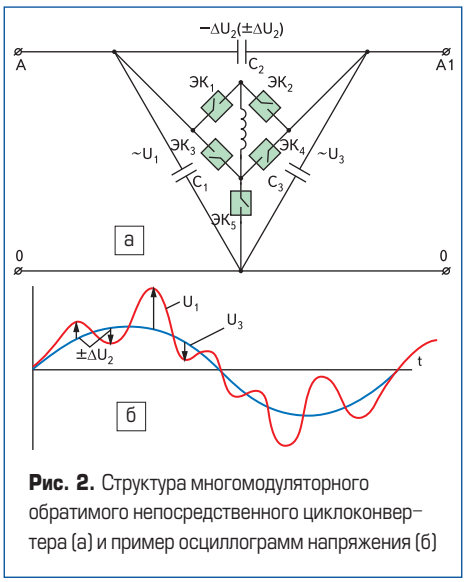

Рис. 2. Структура многомодуляторного обратимого непосредственного циклоконвертера (а) и пример осциллограмм напряжения (б)

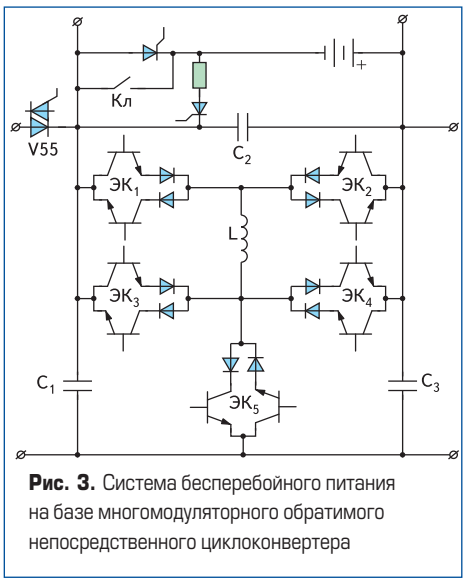

Рис. 3. Система бесперебойного питания на базе многомодуляторного обратимого непосредственного циклоконвертера

Аналогичным образом парируются отклонения и на отрицательной полуволне U_1.

Симметрия структуры позволяет аналогичным образом осуществлять обратное питание — со стороны U_3, например при рекуперативном торможении электропривода, при форсированном гашении магнитного поля (например, возбуждения электромашин) или при взаимодействии двух каналов (сетей).

На рис. 3 приведена принципиальная схема системы бесперебойного питания на базе многомодуляторного ОНЦ и аккумуляторной батареи АБ, подключаемой параллельно C2. При аварийном исчезновении сетевого питания U_1 сначала включается тиристор VS и выключается симистор VSS, а затем симистор VS шунтируется контакторным ключом Кл для снижения тепловых потерь. При этом ОНЦ работает в качестве инвертора с синусоидальным выходным напряжением U_3.

Питающая сеть может быть подключена либо со стороны U_1, либо со стороны U_2. При этом схема позволяет выбирать режимы (прямоходовые с понижением или с повышением напряжения, а также обратноходовой) в зависимости от соотношения между напряжениями и в соответствии с их полярностями.

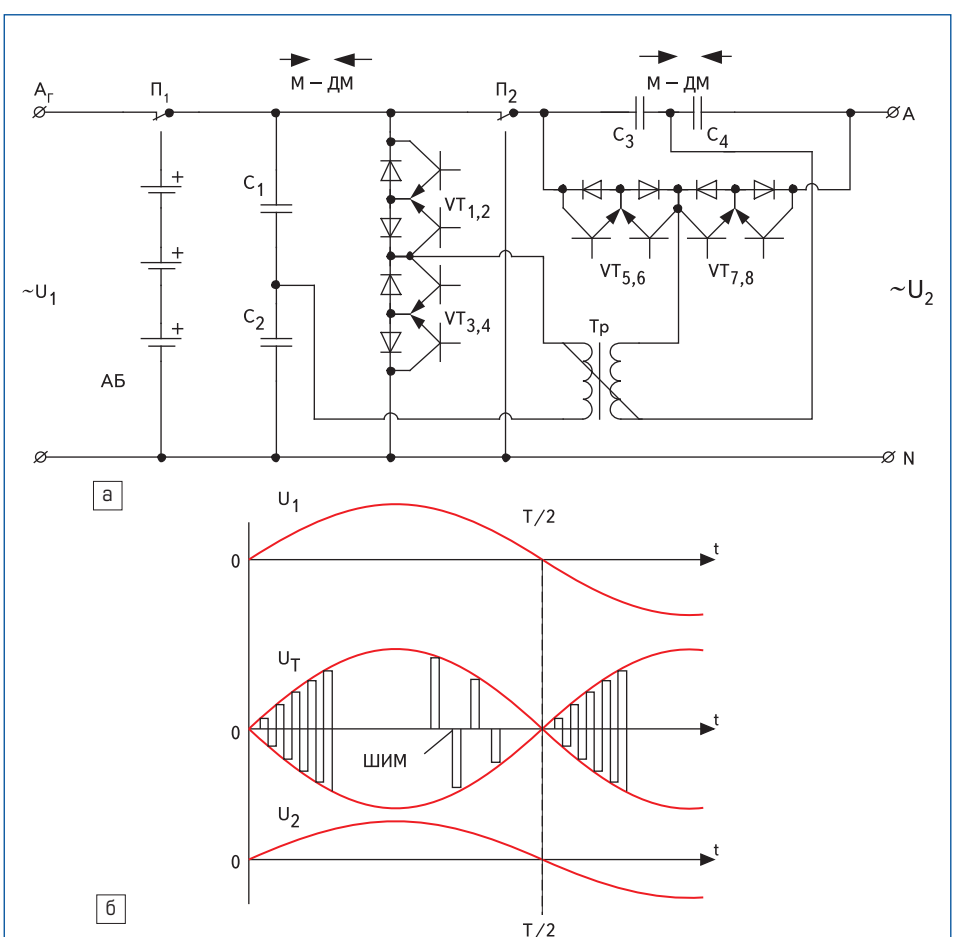

Рис. 4. Схема (а) и временные диаграммы (б) системы бесперебойного питания на базе вольтдобавочного ОТЦ

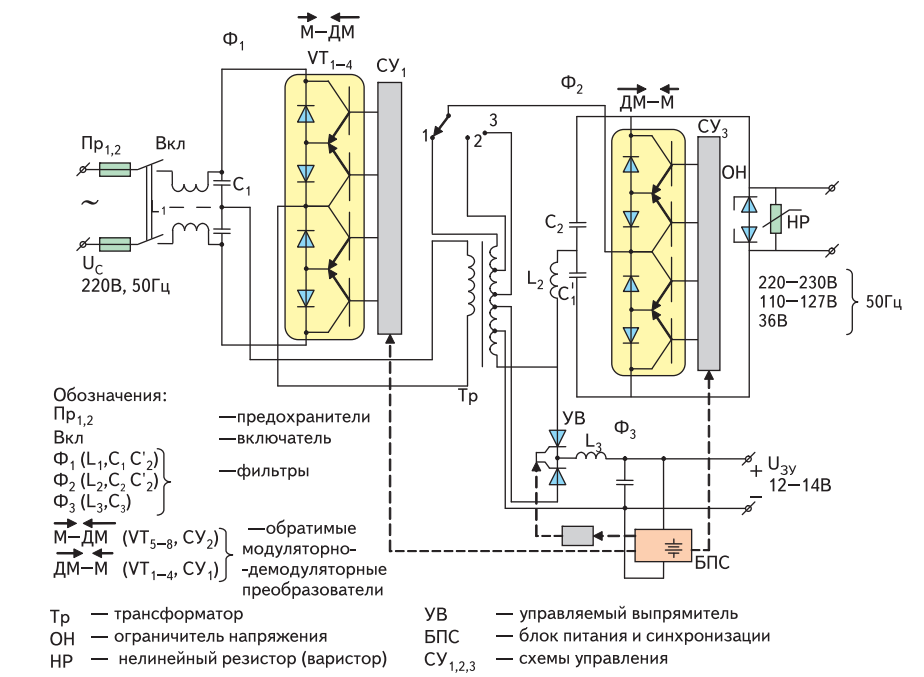

Рис. 5. Силовая схема блока обеспечения электробезопасности и согласования (БЭБС)

Наличие общей точки для входа и выхода позволяет не только использовать общее заземление, но и без затруднений применить схему для трехфазной сети (с тройным комплектом ОНЦ).

Компьютерное «квазианалоговое» моделирование данной схемы показало, что при амплитудно-модулированных колебаниях питающего напряжения порядка 20-30% и номинальной мощности 3-4 кВт стабилизация в вольтдобавочном режиме по сравнению с режимом прямого преобразования позволяет снизить тепловые потери в IGBT-транзисторах на 40–50% (при частоте модуляции 15 кГц).

На рис. 4 приведены схема и временные диаграммы системы бесперебойного питания на базе вольтдобавочного (вольтвычитающего) обратимого трансформаторного циклоконвертера (ОТЦ).

ОТЦ содержит два идентичных полумостовых обратимых модуляторно-демодуляторных блока (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;

б) в виде трансреактора (двухобмоточного дросселя с зазором в сердечнике), но с малым рассеянием.

Во втором варианте демодуляция (ДМ) производится в обратноходовом режиме.

Схема снабжена резервным каналом питания от аккумуляторной батареи (АБ) через переключатели ($П_{1,2}$).

В качестве менее распространенного примера применения ИРА-КФ рассмотрим блок обеспечения электробезопасности и согласования (БЭБС), схема которого приведена на рис. 5. Он представляет собой универсальный защитно-развязывающий, согласующий и стабилизирующий вторичный источник питания на базе повторителя частоты с промежуточным высокочастотным трансформаторным транзисторным импульсным обратимым модулятором и переключателем уровней выходных напряжений.

Схемотехнические и эксплуатационные достоинства:

1) существенно выигрывает по массе, габаритам и стоимости по сравнению с автостабилизаторами на базе низкочастотных трансформаторов при сохранении применимости к нагрузкам с произвольным соотношением активно-реактивных составляющих, а также с приемлемо высокими КПД и надежностью;
2) имеет высокую ремонтопригодность благодаря компактности, простоте и модульному исполнению;
3) позволяет гибко наращивать выходную мощность путем параллельного соединения (благодаря гальванической развязке и независимой самосинхронизации).
4) включает в себя функции сетевых фильтров для защиты от импульсов напряжения электромагнитных радиочастотных помех группы бытовых потребителей.

БЭБС используется для подключения к розеткам сетевого питания группы или одного из бытовых, офисных, исследовательских и промышленных приборов. Обеспечивает электробезопасность их эксплуатации за счет гальванической развязки и понижения напряжения (при возможности использования низковольтного прибора), стабилизирует выходные синусоидальные напряжения трех уровней (220–240 В, 110-–127 В, 36 В; 50/60 Гц), подавляет высоковольтные импульсы, защищая прибор, отфильтровывает электромагнитные радиочастотные помехи, а также обеспечивает зарядку низковольтного аккумулятора (12 В). Устройство пригодно также для питания от розетки трехфазной сети (три блока в цепях «фаза — нейтраль»). Позволяет наращивать выходную мощность путем параллельного включения блоков.

Бытовое применение — в качестве промежуточного защитно-стабилизирующего звена при питании от сети серийно выпускаемых бытовых приборов.

Промышленное, офисное и исследовательское применение:

- Гальваническая развязка, стабилизация и защита от высоковольтных импульсов для лабораторных стендов, измерительных приборов, кондиционеров и компьютеров.
- Использование для развязки с трехфазной сетью (три блока в цепях «фаза — нейтраль»).

Выводы

Предложенные схемы системы бесперебойного питания, а также блока обеспечения электробезопасности и согласования с ИРА-КФ на базе обратимых непосредственных или трансформаторных циклоконвертеров по сравнению с традиционными аналогами имеют следующие преимущества:

- однократное (непосредственное) преобразование энергии, позволяющее повысить КПД, особенно при вольтдобавочном режиме;
- обратимость направления преобразования, позволяющая осуществлять рекуперацию энергии (например, при торможении электропривода, форсированном гашении магнитного поля, взаимосвязи каналов питания и т. п.);
- отсутствие низкочастотных трансформаторов и сглаживающих конденсаторов с большой энергоемкостью и реактивной мощностью;
- произвольное значение номинального напряжения резервной аккумуляторной батареи и произвольная нестабильность ее реального напряжения;
- наличие общей точки входа-выхода (например, заземленной) и простая реализация трехфазного исполнения (для варианта с многомодуляторным ОНЦ);
- обеспечение синусоидальности выходного напряжения без громоздких низкочастотных фильтров.

Результаты моделирования и экспериментальных исследований рассмотренных схем позволяют рекомендовать их для проектирования перспективных систем перечисленных в работе применений, в широком диапазоне мощностей (до 150–250 кВт) на базе IGBT и MOSFET-транзисторов.

Литература

1. Миловзоров В. П., Мусолин А. К. Дискретные стабилизаторы и формирователи напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Кобзев А. В., Лебедев Ю. М., Михальченко Г. Я. и др. Стабилизаторы переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием. М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Сергиев Б. С., Чечулина А. М. Источники электропитания электронной аппаратуры железнодорожного транспорта. М.: Транспорт, 1998.
4. Резников С. Б., Гильбурд О. Л. Системы бесперебойного питания на базе обратимых непосредственных циклоконвертеров // Силовая электроника. 2004. № 2.