

Высоковольтно-составные транзисторные преобразователи с обеспечением электроэнергетической и электромагнитной совместимости

Станислав РЕЗНИКОВ,
Д. Т. Н.
Сергей КОНЯХИН,
К. Т. Н.
rezn@formatek.ru
Александр СОКОЛОВ

Для решения важнейших вопросов электроэнергетической и электромагнитной совместимости высоковольтного электрооборудования, снижения коммутационных всплесков, потерь и помех авторы предлагают использовать высоковольтные преобразователи на базе комбинации составных транзисторно-модулярных столбов, емкостных делителей и защитно-демпфирующих цепочек. Эти устройства представляются пока единственно возможной заменой дорогостоящим, малонадежным, дефицитным и относительно низкочастотным высоковольтным транзисторам и запираемым транзисторам.

Развитие высоковольтной силовой электроники в настоящее время тормозится отсутствием приемлемых по стоимости, надежности, доступности и допустимой рабочей частоте полупроводниковых ключей, появление которых по объективным технологическим причинам пока не предполагается. Последовательное соединение транзисторов с уравнительными RC-цепочками ограничено относительно слаботочными схемами из-за низкого КПД. Применение уравнительных вспомогательных источников также затруднено [1–5]. Однако представляется возможным создание весьма эффективных высоковольтных силовых преобразователей на базе рациональной комбинации составных транзисторно-модуляторных столбов, емкостных делителей и защитно-демпфирующих цепочек [6–12].

Рассмотрим базисные для силовой электроники импульсные модуляторы: понижающий, повышающий и инвертирующий (повышающе-понижающий) с применением указанных комбинаций (рис. 1).

Число n последовательно соединенных конденсаторов (C_{1-n} или C_{n-1}) пассивного делителя напряжения (ПДН) соответствует числу транзисторов (VT_{1-n}) высоковольтно-составного модулятора, а их соответствующие промежуточные выводы соединены между собой вспомогательными диодами (VD_{2-n}), сонаправленными с основным диодом VD_1 , который в паузе замыкает ток нагрузки. Коммутация транзисторного столба производится поочередно-последовательно:

включение начинается с транзистора, ближайшего к VD_1 , а выключение — с противоположного транзистора. При любых коммутациях напряжение на каждом из транзисторов не превышает $1/n$ от следующих величин: напряжения питания U_{Π} (для рис. 1а), напряжения нагрузки U_H (для рис. 1б), суммарного напряжения $U_{\Pi} + U_H$ (для рис. 1в).

Первая защитно-демпфирующая цепочка ДЦ₁ ($C_{1,2}$ –L– VD_{1-3}), шунтирующая основной диод VD_1 , обеспечивает приближенно нулевое начальное напряжение после выключения транзисторного VT-столба. Для этого каждый из конденсаторов цепочки при включении VT-столба колебательно заряжается до вышеуказанных напряжений (U_{Π} , U_H или $U_{\Pi} + U_H$ соответственно), после выключения VT-столба этим противонапряжением нейтрализует (компенсирует) такое же по величине прямое напряжение, а затем рекуперировать накопленную в конденсаторах энергию в цепь нагрузки.

Вторая защитно-демпфирующая цепочка ДЦ₂ ($C_{1,2}$ –L– VD_{1-3}) выполняет две важные функции: во-первых, демпфирует инверсный сверхток, протекающий по цепи VT-столба через основной диод VD_1 при его запирании (рассасывании носителей), а во-вторых, снижает величину dU/dt на VT-столбе после его выключения. Накапливаемая в конденсаторах цепочки энергия также циклически передается в нагрузку.

Третья демпфирующая цепочка ДЦ₃ представляет собой вспомогательную обмотку N_2 трансреактора T–L, которая вместе со вспо-

могательным диодом VD_1 шунтирует основную дроссельно-диодную цепь N_1 – VD_1 модулятора. Благодаря тому, что число витков N_2 на 1–2 витка превышает N_1 , эта цепочка переключает на себя основную часть тока обмотки N_1 в паузе, разгружая по току основной диод VD_1 и снижая тем самым величину его инверсного сверхтока при запирании. При этом величина инверсного сверхтока VD_1 демпфируется общей индуктивностью рассеяния обмоток трансреактора.

И, наконец, четвертая демпфирующая цепочка ДЦ₄ (C–VD–R), шунтирующая каждый из транзисторов, представляет собой классическое средство снижения коммутационных dU/dt , определяемых паразитной индуктивностью монтажных проводов и элементных выводов.

Введение стабилитронов (полупроводниковых ограничителей или варисторов) в состав пассивных делителей напряжения ПДН преследует две цели:

- повышение точности выравнивания напряжений при разбросе параметров и в широком температурном диапазоне;
- ограничение импульсных перенапряжений, возникающих со стороны питания или нагрузки (без увеличения емкости конденсаторов).

Во многих случаях применения конверторов по техническим условиям требуется гальваническая развязка. При этом рациональной альтернативой для схем на базе высоковольтных регулируемых инверторов прямоугольного напряжения и трансформаторно-выпря-

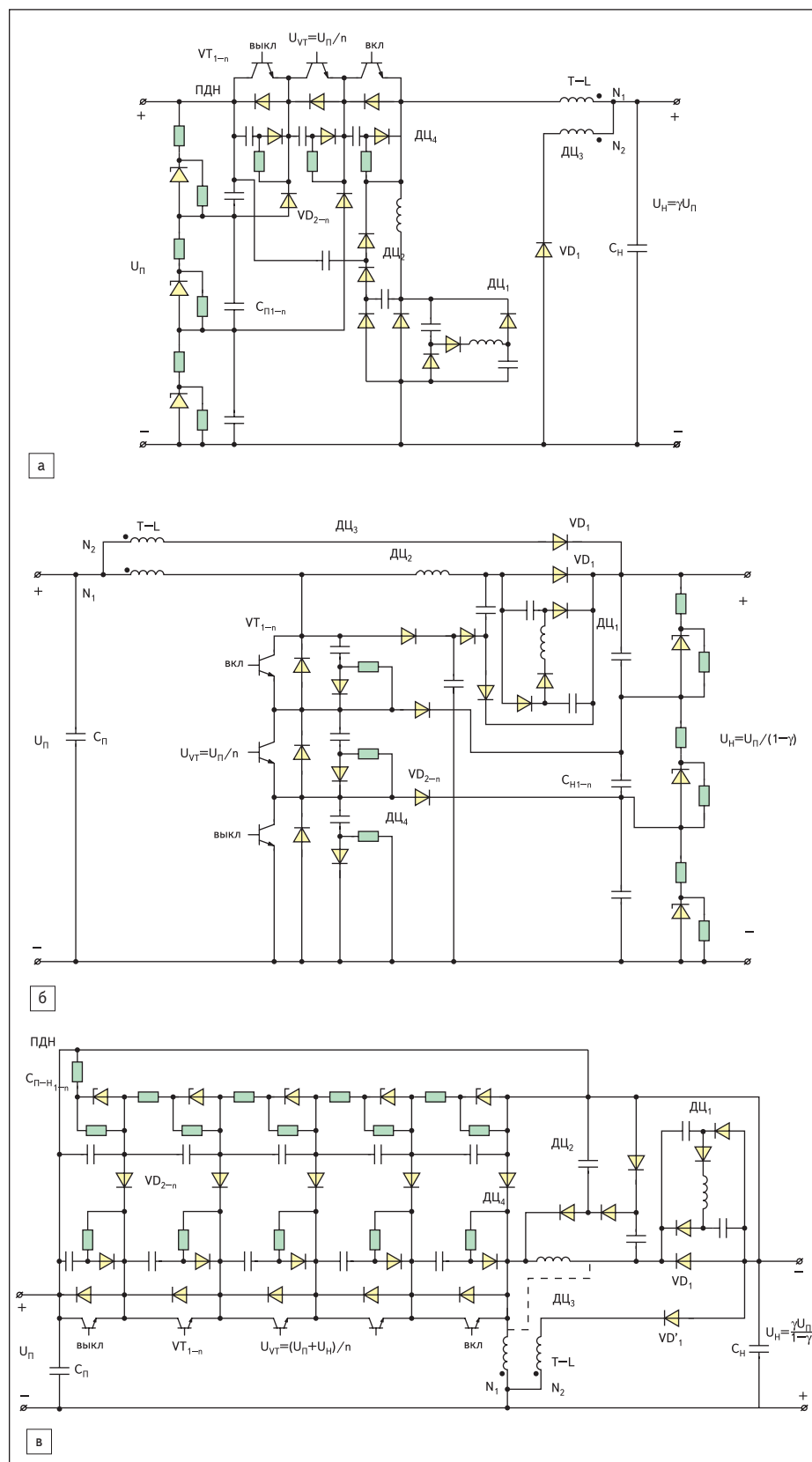


Рис. 1. Высоковольтно-составные импульсные модуляторы с защитно-демпфирующими цепочками (ДЦ) для снижения коммутационных всплесков потерь и помех (du/dt и dl/dt):

а) понижающий, б) повышающий, в) инвертирующий

Примечания:

- 1) сплошными линиями показан вариант для равномерного деления (раздвоения); напряжения; при неравномерном делении используется вспомогательный делитель C_{1-4} (показан пунктиром);
- 2) коммутация транзисторов в столбах осуществляется с временным сдвигом, начиная с указанного на рисунке;
- 3) защитно-демпфирующие цепочки (ДЦ) не показаны.

мительных блоков является трансформаторный конвертор на базе спаренных одноконтурных понижающих высоковольтно-составных (в/с) импульсных модуляторов (рис. 2). В этом варианте возникает возможность использовать не только высоковольтно-составные транзисторные столбы, но и все четыре вышеперечисленные защитно-демпфирующие цепочки (ДЦ₁₋₄). При этом вместо трансформатора можно применять трансреактор Т-Л, а регулирование может осуществляться либо за счет модуляции, либо за счет управляемого выпрямителя (УВ). На рис. 2 в качестве примера нагрузки показана цепь возбуждения (ОВ_{1,2}) группы тягово-приводных электродвигателей (М_{1,2}) с контактным реверсом возбуждения (РВ). Попутно заметим, что если в данной полумостовой схеме вместо трансреактора применить трансформатор со средней точкой или перенести его в нулевой провод (оставив на месте Т-Л балластный дроссель), то получится полумостовой инвертор прямоугольного напряжения (тока).

В случаях, когда потребляемая мощность очень велика (десятки и сотни киловатт), а также когда нижнее звено делителя напряжения используется для питания относительно мощных потребителей (например, обмоток возбуждения электродвигателей) вместо пассивного рекомендуется применять активный делитель напряжения (АДН). В качестве важного для электротранспорта примера на рис. 3 приведена схема тягового электропривода электропоезда или электровоза с отдельным импульсным управлением двигателями. В схеме предусмотрены все необходимые режимы: тяги, рекуперативного и резистивного (динамического) торможения. С этой целью применена обратимая схема импульсного модулятора с переменной структурой: понижающая в режиме тяги и повышающая в тормозных режимах. Переход от одной структуры к другой осуществляется с помощью переключателей (П₁₋₅).

Активный делитель напряжения (АДН) помимо конденсаторной батареи (С₁₋₈) содержит обратимые уравнивающие инвертирующие модуляторные ячейки на базе транзисторно-диодных мостов (VT-VD₁₋₁₄) и трехобмоточных трансреакторов (Т-Л₁₋₇). Указанные ячейки реализуют принцип «транспортирования заряда» [10–12]. При этом не только обеспечивается автоматическое самовыравнивание напряжений на емкостном делителе, но и питание трансформаторного конвертора возбуждения (ТКВ), необходимого в режимах торможения. Регулирование якорного тока, а также аварийное выключение якорной цепи (в случае пробоя на корпус) осуществляется тормозным транзисторно-диодным модулем VT-VDT при запертом развязывающем диоде VD_p.

Силовой реактор L_{ср}, входящий в состав входного фильтра L_{ср}-C_б, зашунтирован защитной тиристорно-диодной цепью (VS-VД) для исключения колебательной дозарядки С_б

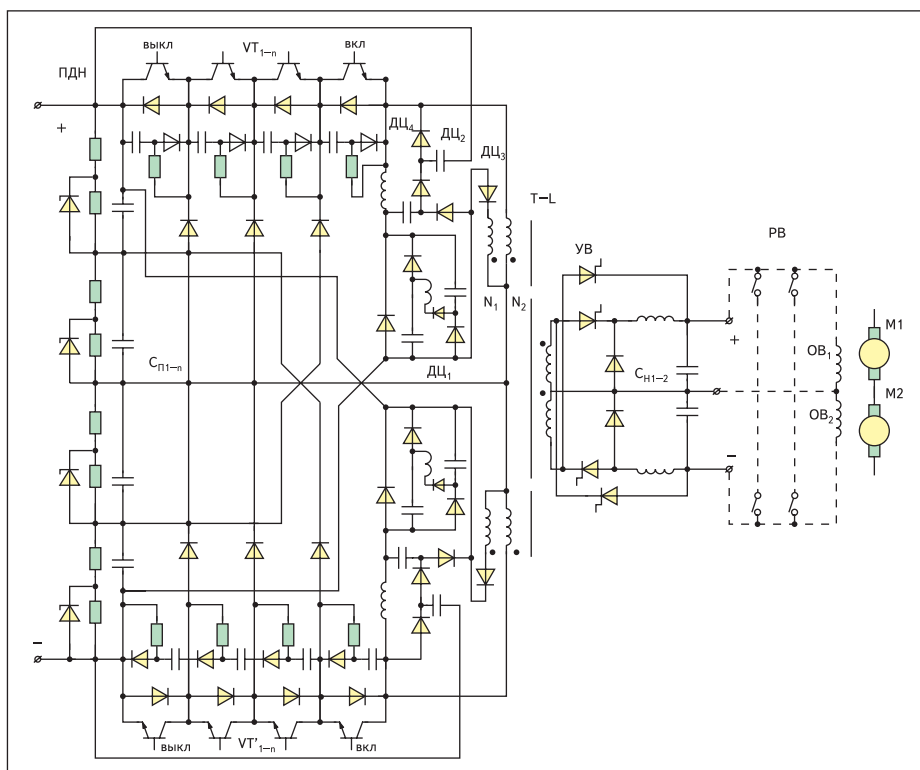
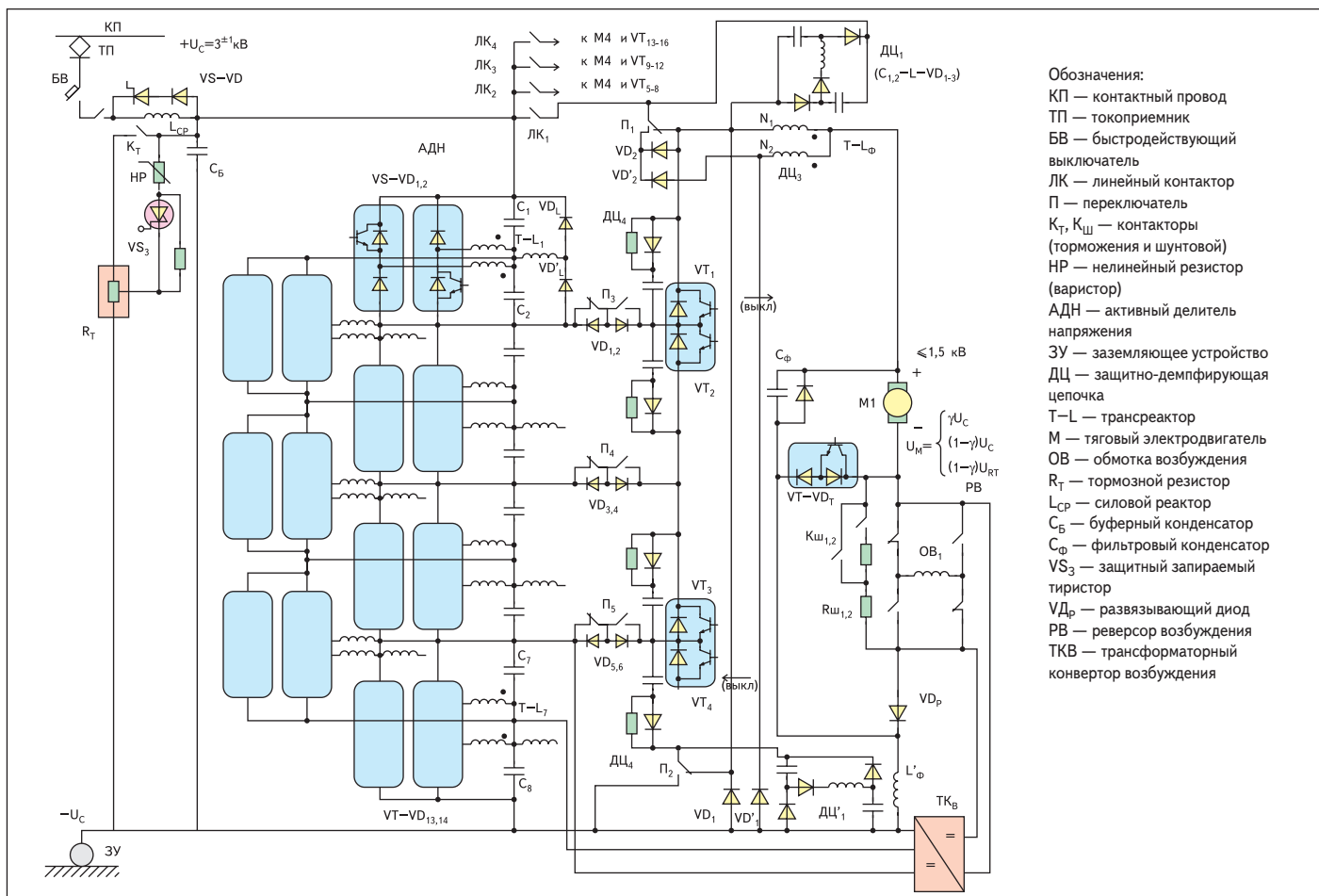


Рис. 2. Трансформаторный конвертор на базе спаренных одноктажных понижающих высоковольтно-составных импульсных модуляторов

и вместе с цепью НР-VS₃ защищает всю схему от коммутационных и грозовых сетевых перенапряжений (вилитовые разрядники для грозовой защиты не показаны).

Приведем основные достоинства описанной схемы тягового электропривода:

- использование относительно дешевых, надежных высокочастотных низковольтных IGBT-транзисторов;
- отсутствие тяговых реостатов (высокий КПД);
- наличие всех видов торможения, причем без специального относительно мощного источника форсирования возбуждения;
- минимальный потенциал якорных обмоток электродвигателя относительно корпуса, не превышающий его рабочего напряжения;
- раздельное управление двигателями, повышающее степень резервирования и облегчающее парирование буксований и юзов;
- надежная защита от сетевых импульсных перенапряжений и внутрисхемных пробоев на корпус;
- исключение псофометрических низкочастотных помеховых колебаний в рельсовой цепи при относительно малой энергоемкости буферной емкостной батареи благодаря способности осуществлять активную транзисторно-модуляторную фильтрацию;



- Обозначения:
- КП — контактный провод
 - ТП — токоприемник
 - БВ — быстродействующий выключатель
 - ЛК — линейный контактор
 - П — переключатель
 - К_Т, К_Ш — контакторы (торможения и шунтовой)
 - НР — нелинейный резистор (варистор)
 - АДН — активный делитель напряжения
 - ЗУ — заземляющее устройство
 - ДЦ — защитно-демпфирующая цепочка
 - Т-Л — трансреактор
 - М — тяговый электродвигатель
 - ОБ — обмотка возбуждения
 - Р_Т — тормозной резистор
 - Л_{СР} — силовой реактор
 - С_Б — буферный конденсатор
 - С_Ф — фильтровый конденсатор
 - VS₃ — защитный запираемый тиристор
 - VD_р — развязывающий диод
 - РВ — реверсор возбуждения
 - ТКВ — трансформаторный конвертор возбуждения

Рис. 3. Тяговый электропривод с сетевым питанием и раздельным импульсным управлением двигателями

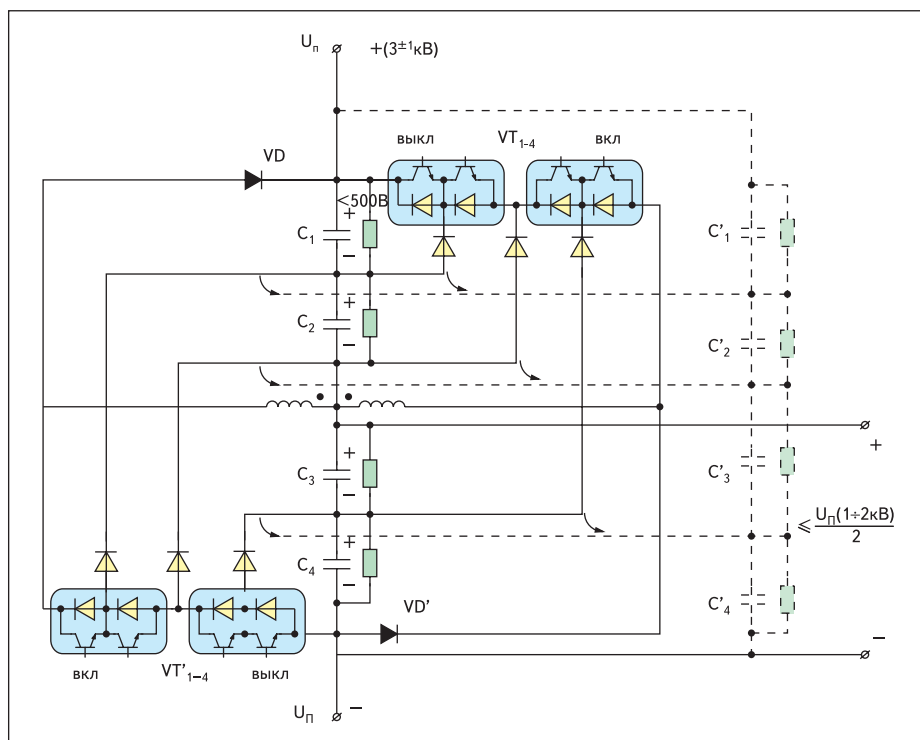


Рис. 4. Высоковольтный обратимый активный делитель напряжения (обратимый конвертор)

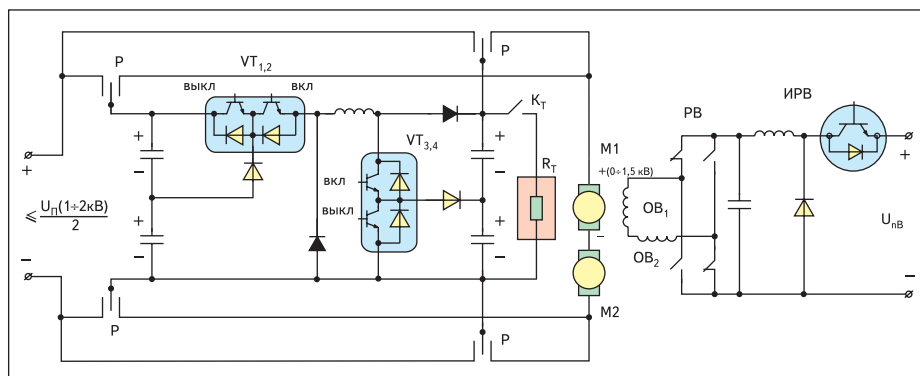


Рис. 5. Реверсивный комбинированный конвертор (понижающе-повышающий) для тягового электропривода

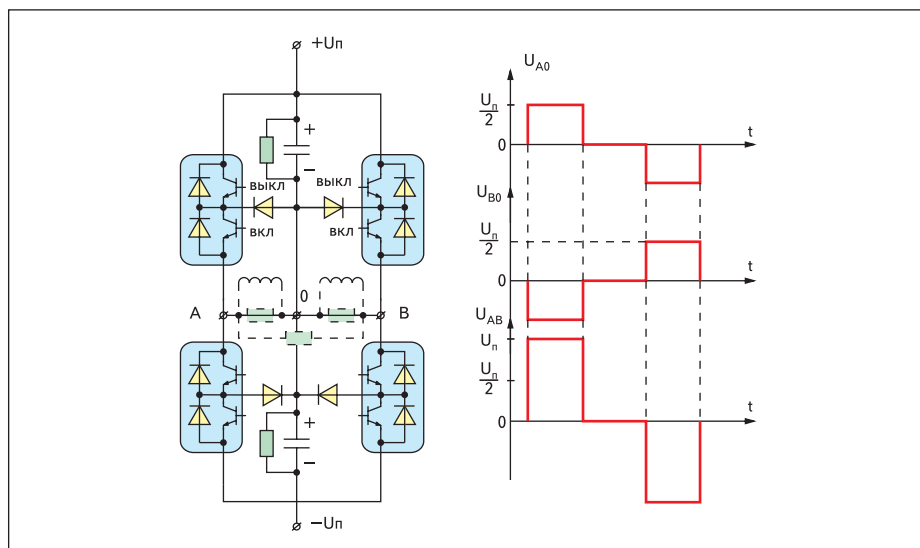


Рис. 6. Высоковольтный мостовой инвертор прямоугольного напряжения с широтным регулированием

• применение комбинированной защиты от транзисторно-коммутационных всплесков, потерь и помех (dU/dt и dI/dt).

Возможен альтернативный вариант реализации канала питания тягового электропривода на базе упрощенного высоковольтного обратимого активного делителя напряжения — обратимого конвертора (рис. 4) и реверсивного комбинированного (понижающе-повышающего) конвертора (рис. 5). Для упрощения демонстрации демпфирующие цепочки (ДЦ) на рис. 4 и 5 не показаны.

Сочетание однотактных импульсных преобразователей позволяет получить схемы инверторов. На рис. 6 показан высоковольтный мостовой инвертор прямоугольного напряжения с широтным регулированием (демпфирующие цепочки не показаны). Его выход выполнен со средней точкой.

На рис. 7 приведена схема высоковольтного мостового инвертора прямоугольного тока с трансформаторным выходом и входным импульсным регулятором-выключателем. Выход инвертора зашунтирован фильтровым емкостным делителем.

На рис. 8 приведены схемы и временная диаграмма выходного напряжения регулируемого однофазного инвертора синусоидального или квазисинусоидального (ступенчатого) напряжения на базе активного делителя напряжения (АДН) и ступенчатого коммутатора (СК). Выбираемое число ступеней определяется желаемым качеством кривой и высоковольтностью выходного напряжения и реализуется соответствующим количеством звеньев АДН и коммутирующих однооперационных тиристоров (VS). Уравнительные инвертирующие модуляторные ячейки АДН способны сгладить ступенчатую форму выходного напряжения, сведя ее к синусоидальной. Для этого напряжение на каждом из конденсаторных звеньев АДН периодически и поочередно плавно обнуляется. Следует, однако, отметить, что при этом напряжение питания делится не на n , а на $n-1$ частей, что может потребовать добавления одного конденсатора в АДН. Искусственное запираение любого из тиристоров производится с помощью соответствующей транзисторной пары (VT_1-VT_2 или $VT_1'-VT_2'$). Защитный двухобмоточный дроссель L_3 исключает «сверхтоки» из-за случайного «сквозного» режима.

При реализации трехфазного инвертора потребуется утроить лишь число ступенчатых коммутаторов, оставив по-прежнему всего один АДН, общий для трех фаз. При этом число ступеней в кривой выходного линейного напряжения существенно увеличивается по сравнению с фазным, что важно при использовании нагрузки, соединенной в треугольник. ■

Литература

1. Белов Г. А., Кузьмин С. А. Преобразователи переменного напряжения 380 В в стабилизиро-

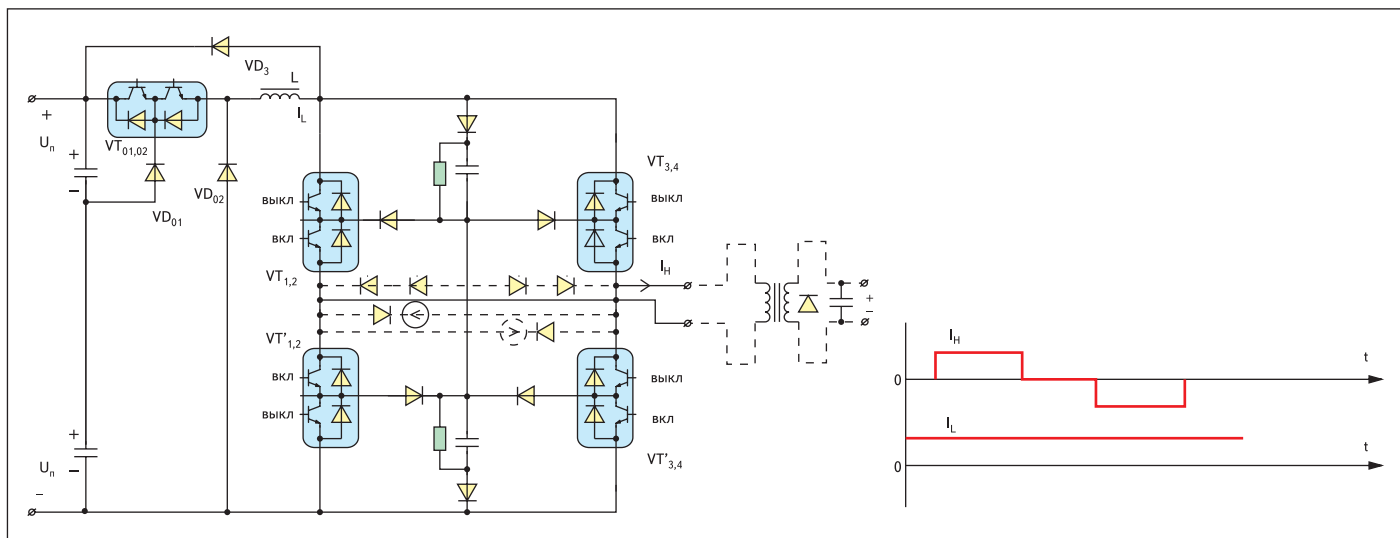


Рис. 7. Высоковольтный мостовой инвертор прямоугольного тока с трансформаторным выходом и входным импульсным ШИМ-регулятором — выключателем

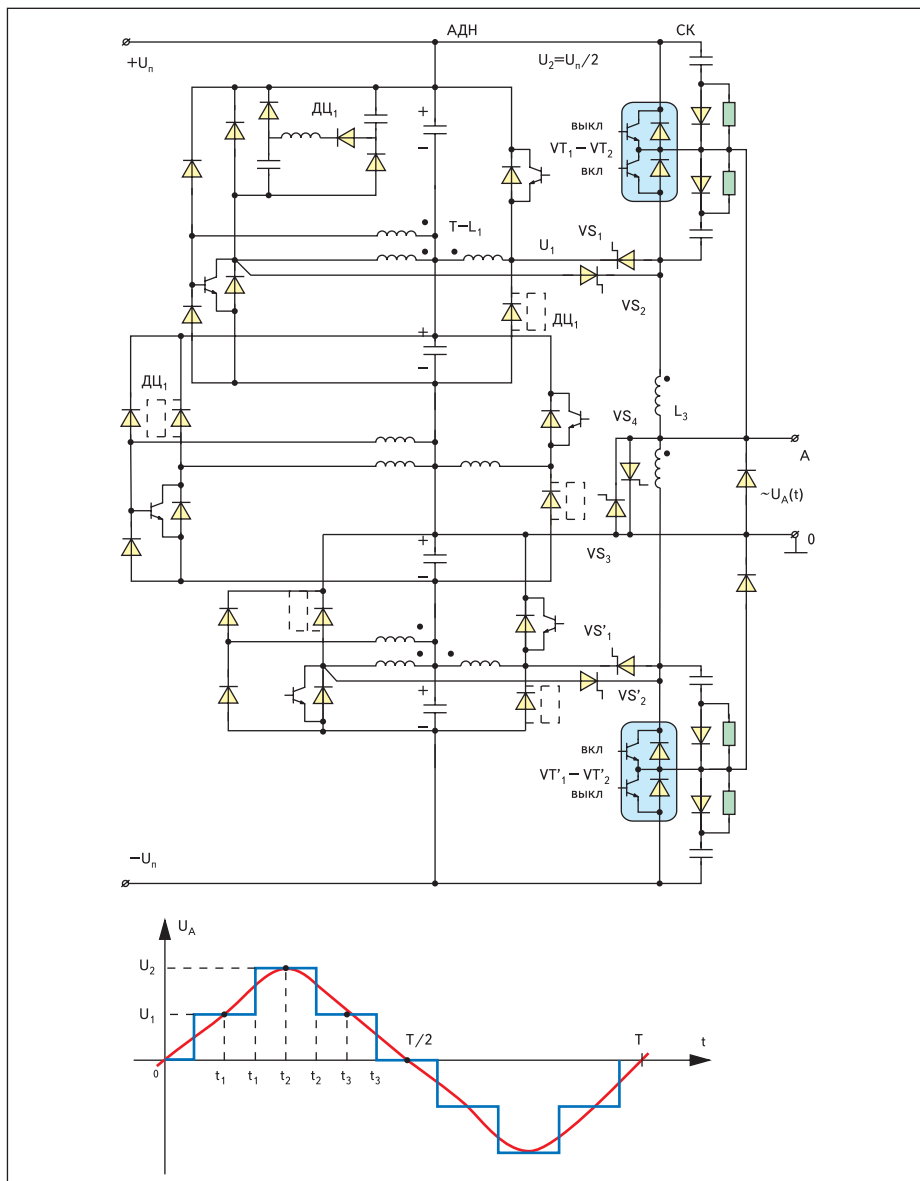


Рис. 8. Регулируемый однофазный инвертор синусоидального или квазисинусоидального (ступенчатого) напряжения (на базе активного делителя напряжения (АДН) и ступенчатого коммутатора (СК))

ванное постоянное // Электронная техника в автоматике / Под ред. Ю. И. Конева. Вып. 12. М.: Радио и связь, 1981.

2. Моин В. С., Лаптев Н. Н. Стабилизированные транзисторные преобразователи. М.: Энергия, 1972.
3. Белов Г. А., Кузьмин С. А. Импульсный регулятор постоянного напряжения с последовательным соединением транзисторов // Электронная техника в автоматике / Под ред. Ю. И. Конева. Вып. 11. М.: Сов. Радио, 1980.
4. Белов Г. А., Кузьмин С. А. Разработка и исследование мощного транзисторного импульсного регулятора // Применение полупроводниковых приборов в преобразовательной технике. Чебоксары, 1980.
5. Белов Г. А. Высокочастотные тиристорно-транзисторные преобразователи постоянного напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Транзисторные преобразователи электрической энергии. М.: Изд-во МАИ, 2001.
7. Глебов Б., Лебедев А., Недолужко И. Расчет с помощью SPICE демпфирующих цепочек для транзисторных ключей преобразователей напряжения // Силовая электроника. 2005. № 4.
8. Глебов Б. А. Бесконтактное коммутационное устройство. А. С. СССР № 1122562, Кл. Н03К17/64. 1984. Бюл. № 33.
9. Резников С., Чуев Д., Бутенко П., Савенков А., Кузень С., Бекетова А. Энергоэкономичные регулируемые инверторы с пассивными демпферно-коммутационными цепочками // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 5.
10. Резников С., Булеков В., Болдырев В., Бочаров В. Новый принцип обратимого выпрямительно-инверторного преобразования с ШИМ-коррекцией мощности // Силовая электроника. 2005. № 1.
11. Резников С. Б. Самолетная система электропитания квазипостоянного повышенного напряжения // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 4.
12. Резников С. Чуев Д. Защита от сверхтоков и перенапряжений и снижение коммутационных потерь в силовых импульсных преобразователях // Компоненты и технологии. 2006. № 5.