

Выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава

с высоким коэффициентом мощности в режиме рекуперативного торможения

В настоящее время существует несколько альтернативных технологий производства IGBT и модулей на их основе. В статье рассматриваются Press-Pack IGBT, построенные на основе наиболее перспективной технологии для применения в жестких условиях эксплуатации и обладающие рядом уникальных характеристик.

**Олег Мельниченко
Алексей Линьков
Юрий Газизов
Иван Полянский**

Согласно Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2030 г., одними из приоритетных задач являются:

- повышение эффективности рекуперативного торможения как одного из существенных факторов энергосбережения в электрической тяге;
- совершенствование схем рекуперативного торможения, расширение диапазона скоростей его использования;
- применение современных преобразовательных агрегатов на основе силовых управляемых полупроводниковых приборов и др.

На современных отечественных электроваззах с тиристорными выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) коэффициент мощности в режиме рекуперативного торможения не превышает 0,65. На базе таких преобразователей созданы электроваззы переменного тока серий ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1 в/и, ВЛ80ТК, Э5К и 2(3)ЭС5К («Ермак») [1, 2]. На сегодня эти электроваззы, согласно ГОСТ 55364-2012, не отвечают современным требованиям в части энергоэффективности.

Основные причины низкого коэффициента мощности электроваззов в режиме рекуперативного торможения [4, 5]:

- Организация коммутации тока плеч ВИП осуществляется в конце полупериода с углом β .
- Коммутация тока протекает поочередно в плечах преобразователя, что увеличивает ее длительность.
- Необходимость в наличии значительного угла запаса инвертора δ .

- Фазовое регулирование напряжения осуществляется с конца полупериода и др.

Появление IGBT позволяет решить десятилетиями существовавшую проблему обеспечения силовых схем электроваззов переменного тока простыми и надежными ключевыми элементами, обладающими высоким быстродействием, малыми затратами на управление, устойчивостью к многократным перегрузкам и полной управляемостью [3].

Тяговые преобразователи, разработанные на базе IGBT, выгодно отличаются двумя особенностями, важными как для железных дорог, так и для из-

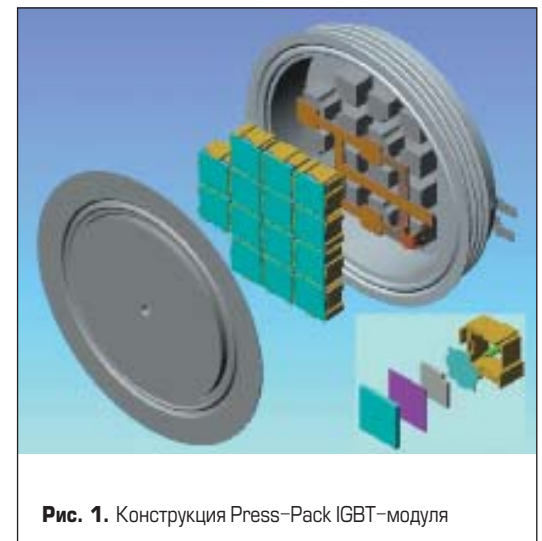


Рис. 1. Конструкция Press-Pack IGBT-модуля

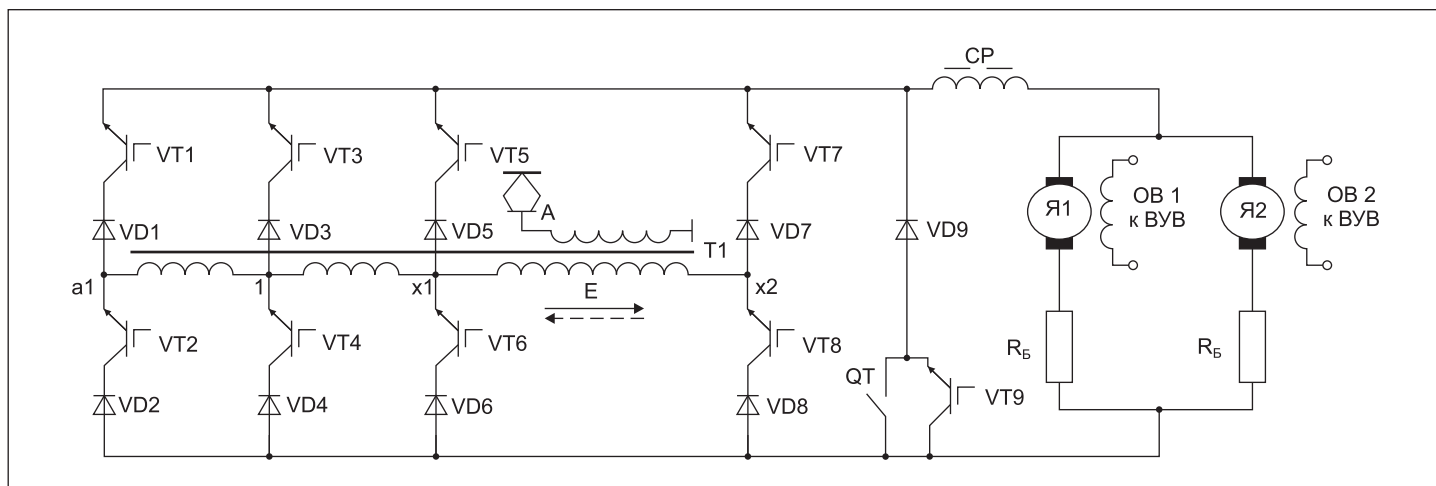


Рис. 2. Принципиальная схема предлагаемого выпрямительно-инверторного преобразователя в режиме рекуперативного торможения

готовителей. Прежде всего, эти устройства создают потенциальные возможности для снижения энергозатрат на тягу поездов, главным образом благодаря новым алгоритмам управления. В отличие от запираемых тиристоров, IGBT управляются напряжением при довольно малых управляющих токах заряда и разряда входной емкости полупроводникового прибора. Благодаря этому значительно упрощается схема управления затвором.

На сегодня существует несколько альтернативных технологий производства IGBT и модулей на их основе. Мы не будем останавливаться подробно на всех из них, но отметим, что наиболее перспективной технологией для применения в жестких условиях эксплуатации является Press-Pack IGBT, которая обладает рядом уникальных характеристик.

Конструкция модулей (рис. 1) полностью «прижимная», герметичная, исключая пайку и сварку. Благодаря этому Press-Pack IGBT имеют возможность равномерного двухстороннего охлаждения, что обеспечивает повышенную устойчивость к термоциклированию. Кроме того, «ячеистая» внутренняя структура, состоящая из множества одинаковых кристаллов IGBT, обеспечивает более равномерное распределение механических напряжений при тепловых расширениях по сравнению с классическими тиристорами с одним большим кристаллом, где данные напряжения «накапливаются» от центра к периферии.

Если сравнивать данную конструкцию с IGBT-модулями на изолированном основании, то Press-Pack IGBT имеют полностью симметричное распределение как тепловых сопротивлений, так и паразитных индуктивностей со стороны эмиттера и коллектора, в то время как конструкция с изолированным основанием имеет существенные различия данных параметров с коллекторной и эмиттерной стороны, поскольку верхняя часть кристалла соединяется с силовыми шинами проволокой или иными элементами, в то время как нижняя часть кристалла припаяна к керамической DBC-подложке.

Главное же преимущество Press-Pack IGBT заключается в предсказуемости процесса выхода их из строя в устойчивое короткое замыкание, что позволяет упростить схему контроля и предотвращает дальнейшее распространение аварии в другие цепи преобразователя. Отметим также возможность эксплуатации Press-Pack IGBT при температурах от -60 °С.

Силовая схема предлагаемого ВИП электровоза на IGBT в расчете на одну тележку, аналогично штатной, состоит из восьми плеч с добавлением еще одного плеча, включенного параллельно цепи выпрямленного тока (рис. 2) [6]. Это плечо состоит из диода VD9 и IGBT-модуля VT9, включенного параллельно тормозному переключателю QT. Диод VD9 служит для уменьшения коммутационных перенапряжений при включении и отключении IGBT. В режиме рекуперативного торможения дополнительное плечо вступает в работу только в те моменты времени, когда все остальные плечи ВИП выключены.

Остальные плечи ВИП состоят из IGBT-модулей, включенных последовательно с диодом (например, плечо 5 состоит из модуля VT5 и диода VD5). Трансформатор T1 принимается штатным для электровозов переменного тока с зонно-фазовым регулированием.

Для реализации предлагаемого алгоритма управления ВИП необходимо в качестве полупроводниковых приборов в плечах использовать полностью управляемые IGBT-транзисторы. Основным параметром управления плечами становится длительность открытия IGBT-модулей в полупериоде выпрямленного напряжения.

Для предлагаемой схемы ВИП электровоза с использованием IGBT и дополнительного плеча разработан алгоритм управления в режиме рекуперативного торможения (таблица). Аналогично штатному алгоритму, предлагается четыре зоны регулирования. Алгоритм имеет пять управляющих сигналов:

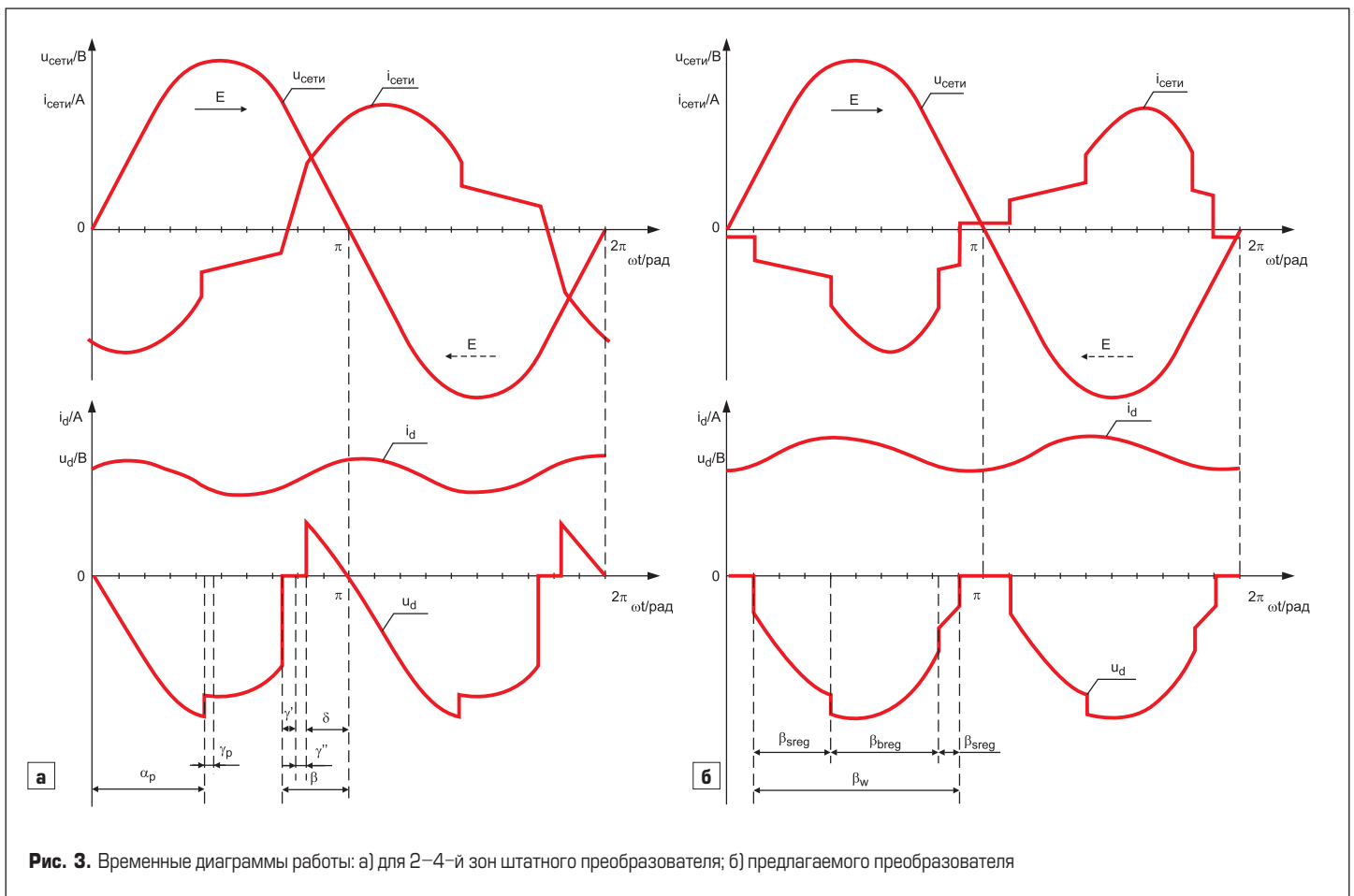
- β_w (work) — рабочая временная зона открытия IGBT-модулей плеча ВИП;
- β_{breg} (big regulation) — временная зона регулирования открытия IGBT-модулей плеча ВИП по большому контуру;
- β_{sreg} (small regulation) — временная зона регулирования открытия IGBT-модулей плеча ВИП по малому контуру;
- β_D (Diode) — временная зона работы диода дополнительного плеча ВИП;
- α_{reg} (regulation) — временная зона регулирования открытия IGBT-модулей.

Предлагаемый алгоритм несет в себе особый смысл, заключающийся в обеспечении компенсации реактивной составляющей рекуперированного тока. Это достигается за счет того, что регулирование напряжения инвертора происходит как по переднему, так и по заднему фронтам, путем перемещения фазы открытия и закрытия плеч ВИП к средней части полупериода.

На рис. 3 для сравнения приведены временные диаграммы работы штатного и предлагаемого ВИП для 4-й зоны регулирования. Приращение напряжения высшей зоны инвертора происходит при максимальных значениях напряжения сети, а это, в свою очередь, увеличивает рекуперированный ток в активной его части. За счет этого значительно уменьшается угол сдвига фаз между током и напряжением первичной обмотки тягового трансформатора, следовательно, повышается коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения. Принцип работы

Таблица. Предлагаемый алгоритм управления плечами ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения

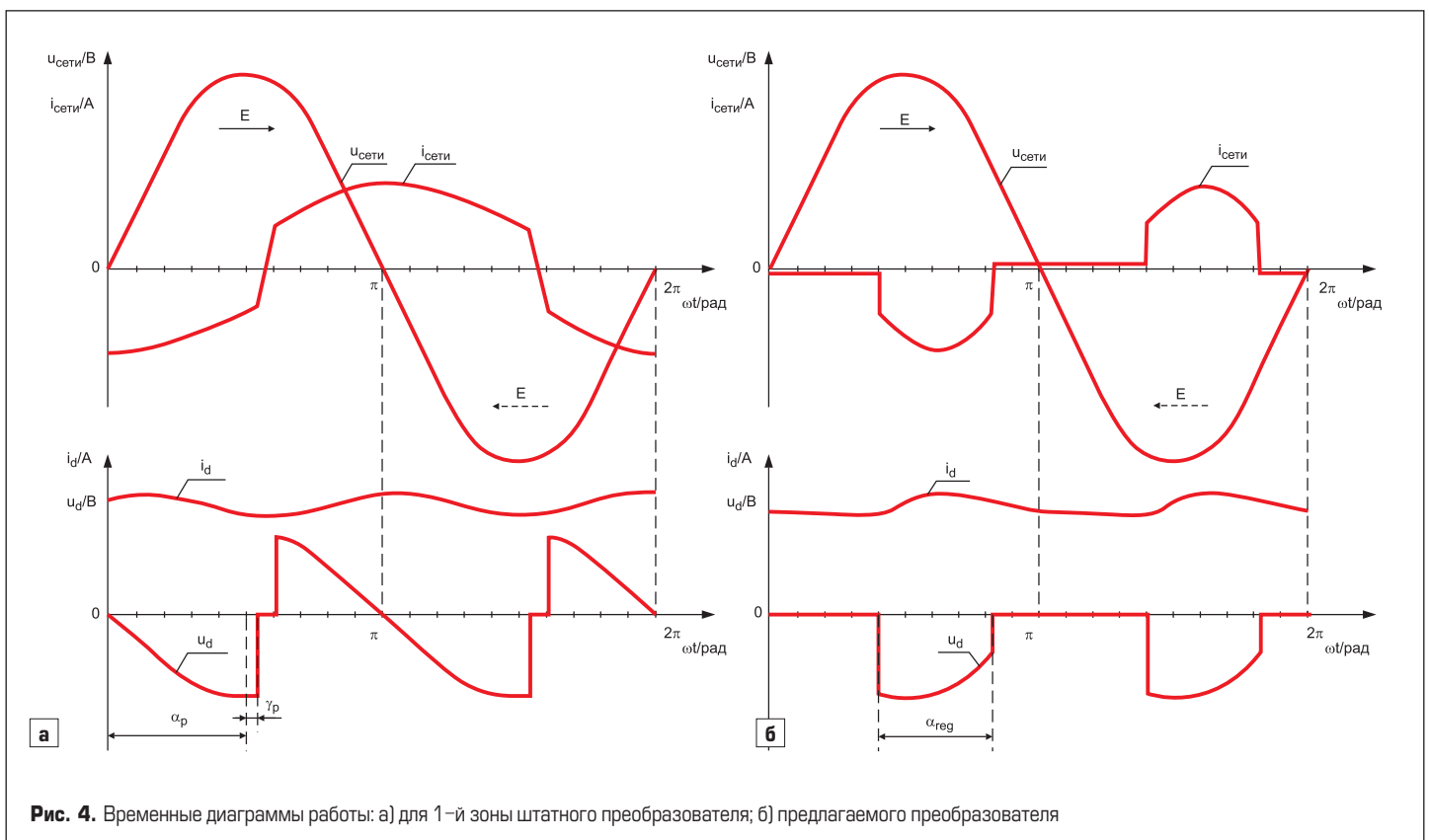
Зона	Полупериод напряжения	Плечи ВИП								
		VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6	VT7	VT8	VT9
4	→→→	β_{breg}	-	β_{sreg}	-	-	-	-	β_w	β_D
	←←←	-	β_{breg}	-	β_{sreg}	-	-	β_w	-	β_D
3	→→→	-	-	β_{breg}	-	β_{sreg}	-	-	β_w	β_D
	←←←	-	-	-	β_{breg}	-	β_{sreg}	β_w	-	β_D
2	→→→	β_{breg}	-	β_{sreg}	-	-	β_w	-	-	β_D
	←←←	-	β_{breg}	-	β_{sreg}	β_w	-	-	-	β_D
1	→→→	-	-	α_{reg}	-	-	α_{reg}	-	-	β_D
	←←←	-	-	-	α_{reg}	α_{reg}	-	-	-	β_D



для 3-й и 2-й зон по смыслу одинаков и отличается только величиной выпрямленного напряжения инвертора.

На рис. 4 для сравнения приведены временные диаграммы работы штатного и предлагаемого ВИП в режиме рекуперативного торможения на 1-й зоне регулирования.

Алгоритм работы преобразователя на 1-й зоне регулирования несколько отличается от работы ВИП на других зонах. Напряжение инвертора определяется напряжением только секции 1–x1 обмотки трансформатора (рис. 4). Инвертирование осуществляется за счет подачи сигнала управления α_{reg} на модули плеч в соответствии с предлагаемым алгоритмом работы пре-



образователя (таблица). На диаграмме (рис. 46) видно, что ток сети при предлагаемом способе регулирования по фазе более близок к напряжению сети, что и обуславливает более высокий коэффициент мощности.

Работа предлагаемого ВИП электровоза предусматривает переключение транзисторов с частотой, соответствующей частоте напряжения контактной сети, а следовательно, она практически не будет отличаться от тиристорных ВИП по электромагнитной совместимости с аппаратурой СЦБ и связи.

В дальнейшем мы планируем подробнее познакомить читателей с результатами испытаний прототипа предлагаемого ВИП, а также сопоставим характеристики предлагаемого решения с электрическими и механическими параметрами «типового» технического решения на основе высокочастотных преобразователей для асинхронных тяговых электродвигателей. ■

Литература

1. Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова и др. Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации. М.: Транспорт. 1995.
2. Электровоз ЭП1: Руководство по эксплуатации. Изд. 2-е. Т. 1, 2 (в четырех книгах). Под ред. А. В. Омельченко. Ростов-на-Дону: СХКТБ «БелРусь». 2006.
3. Семенов Б. Ю. Силовая электроника. От простого к сложному. М.: СОЛОН-Пресс. 2005.
4. Тихменев Б. Н., Трахтман Л. М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог: теория работы электрооборудования. Электр. схемы и аппараты. [Учебник для вузов ж.-д. трансп.] М.: Транспорт. 1980.
5. Тихменев Б. Н., Кучумов В. А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М.: Транспорт. 1988.
6. Мельниченко О. В., Яговкин Д. А., Портной А. Ю., Шрамко С. Г. Способ повышения энергетических показателей электровозов переменного тока с ВИП на IGBT-транзисторах (модулях) по критерию потребления максимально активной мощности // Пат. №2557006, Рос. Федерация: МПК H02M 5/40, заявитель и патентообладатель Иркутский гос-ый ун-т путей сообщения – №2014104274/07, заявл. 06.02.14; опубл. 20.07.2015. Бюл. №20.