

Д-р техн. наук С. В. Покровский (компания Bombardier)

Тяговые преобразователи высокой мощности на IGBT-транзисторах

В журнале «Железные дороги мира», 2005, №5 была опубликована статья специалистов компании Bombardier Transportation о новом поколении тяговых преобразователей высокой мощности MITRAC TC3300. Эти преобразователи имеют унифицированную модульную компоновку и построены на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT). С тех пор это семейство тяговых преобразователей существенно расширилось благодаря появлению разнообразных модификаций, адаптированных для оптимальной реализации заданных заказчиками технических характеристик локомотивов различных серий.

Впервые тяговые преобразователи семейства MITRAC TC3300 были установлены на грузовых электровозах серии Re 484, предназначенных для операторской компании SBB Cargo Федеральных железных дорог Швейцарии. Электровоз рассчитан на работу от трех систем электроснабжения: переменного тока 25 кВ/50 Гц и 15 кВ/16,7 Гц, а также постоянного тока 3 кВ.

Эти локомотивы были введены в эксплуатацию в конце 2004 г. По состоянию на начало 2010 г. подписаны 44 контракта на поставку тяговых преобразователей семейства MITRAC TC3300 различных модификаций. Общее число поставленных преобразователей составило более 2200 ед.

Модификации тяговых преобразователей MITRAC TC3300 в первую очередь различаются рабочими системами тягового электроснабжения электровозов:

- многосистемных;
- одного вида переменного тока;

- постоянного тока.

Также на основе унифицированных элементов был создан тя-



Рис. 1. Силовой модуль

говый преобразователь семейства MITRAC TC3300 для магистральных тепловозов. Кроме того, тяговые преобразователи данного семейства имеют несколько компоновочных концепций.

Основным унифицированным элементом тягового преобразователя является силовой модуль (рис. 1), рассчитанный на установку 12 IGBT-транзисторов со стандартным исполнением корпуса (рис. 2).

В проекте преобразователя MITRAC TC3300 для электровоза Re 484 использованы IGBT-транзисторы 65-го класса с предельно допустимым длительным прямым постоянным током 600 А. Полупроводниковые приборы такого класса необходимы в том случае, если электровоз рассчитан на работу от системы тягового электроснабжения постоянного тока с номинальным напряжением на токоприемнике 3 кВ.

Для электровозов переменного тока при номинальном напряжении в промежуточном звене преобразователя 2800 В необходимости в таких высоковольтных приборах нет. В связи с этим в модификациях преобразователей для электровозов переменного тока используют IGBT-транзисторы 45-го класса с предельно допустимым длительным прямым постоянным током 900 или 1200 А в зависимости от требуемой мощности тяговых двигателей и выбранной структуры преобразователя. Эти полупроводниковые приборы имеют аналогичную конструкцию корпуса и установочные размеры.

Базовый проект тягового преобразователя семейства MITRAC TC3300 для электровоза серии Re 484 скомпонован на основе четырех силовых модулей (рис. 3). Функционально силовые модули, расположенные в правой нижней части корпуса, распределены следующим образом (рис. 4):

- два сетевых преобразователя (по 12 IGBT-транзисторов);

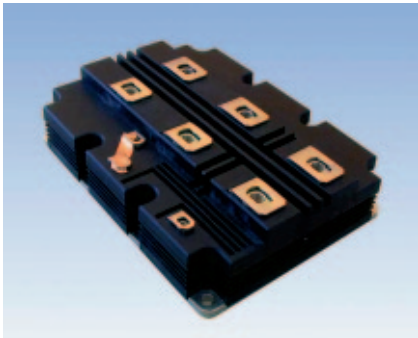


Рис. 2. IGBT-транзистор

- прерыватель тормозного резистора (два IGBT-транзистора) и однофазный инвертор для питания собственных нужд (два IGBT-транзистора);
- два трехфазных инвертора (12 IGBT-транзисторов).

В электровозе установлено два таких преобразователя. Каждый из них имеет единое промежуточное звено и рассчитан на максимальную мощность на ободе 2×1400 кВт при работе электровоза от систем тягового электроснабжения переменного



Рис. 3. Общий вид тягового преобразователя для электровоза Re 484

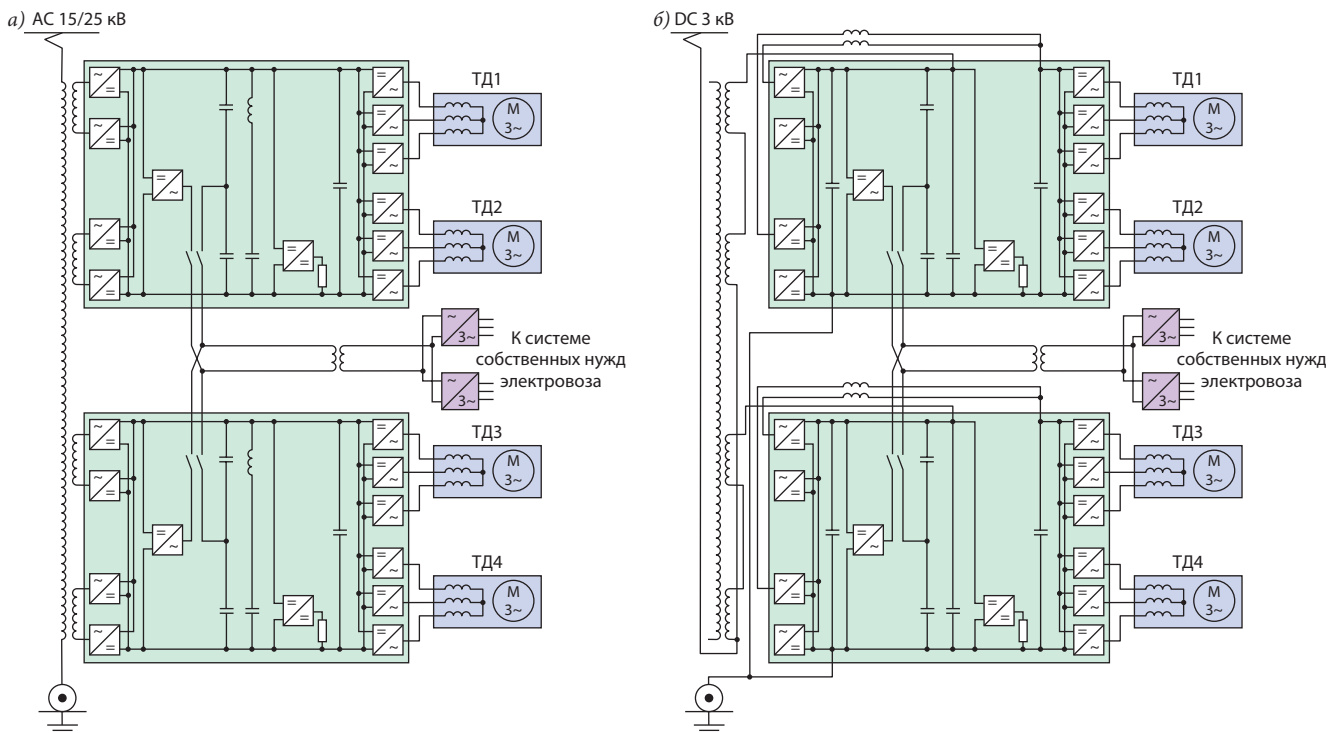


Рис. 4. Упрощенные схемы силовых цепей электровоза серии Re 484:

a – переменный ток (AC) напряжением 15 и 25 кВ; *б* – постоянный ток (DC) напряжением 3 кВ; ТД – асинхронный трехфазный тяговый двигатель



Рис. 5. Тяговая секция высокоскоростного поезда AVE S 130 железных дорог Испании

го тока напряжением 15 и 25 кВ, а также постоянного тока напряжением 3 кВ.

Габаритные размеры преобразователя для электровоза Re 484 — 2800×1980×1050 мм. Масса преобразователя с охлаждающей жидкостью составляет 2960 кг.

Первой модификацией базового проекта семейства MITRAC TC3300 стал преобразователь тяговой сек-

ции двухсистемного высокоскоростного поезда с изменяемой шириной колеи AVE S 130 (рис. 5), разработанного для железных дорог Испании (RENFE).

По требованию заказчика четырехосная тяговая секция поезда AVE S 130 должна была иметь нагрузку от оси на рельсы не выше 18 т при мощности на ободе 2400 кВт. Также была поставлена задача ин-

тегрировать в тяговые преобразователи каждой такой секции два независимых трехфазных канала для питания цепей собственных нужд тяговой секции.

Проработки показали, что при использовании модульной концепции преобразователь для тяговой секции поезда AVE S 130 может быть успешно реализован в едином корпусе с габаритными размерами базового варианта на основе четырех силовых модулей. Масса этого преобразователя также получилась около 3000 кг.

На рис. 6 представлена упрощенная электрическая схема силовых цепей тяговой секции AVE S 130. Как видно, преобразователь содержит две полностью независимые идентичные цепи, каждая из которых питает два параллельно включенных тяговых двигателя.

Функционально четыре силовых модуля распределены следующим образом:

- сетевой преобразователь TR1 и прерыватель тормозного резистора Br1 (10 IGBT-транзисторов);
- трехфазный тяговый инвертор TI1 и трехфазный инвертор

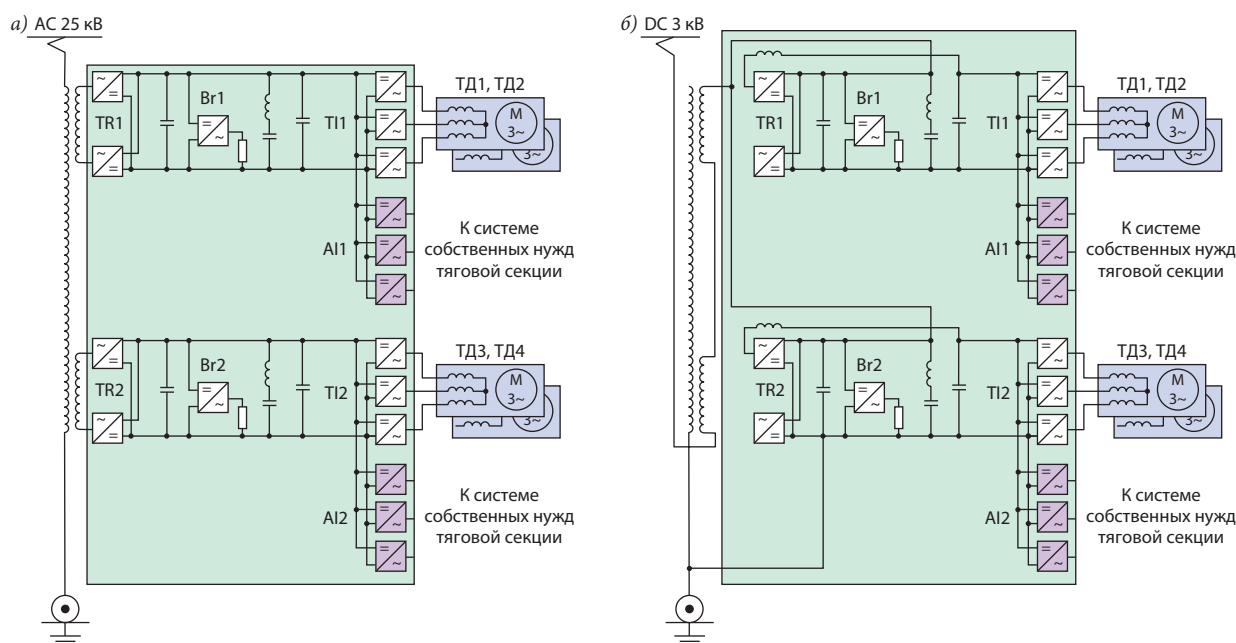


Рис. 6. Упрощенные схемы силовых цепей тяговой секции поезда AVE S 130: а — при работе от системы тягового электроснабжения переменного тока; б — то же, постоянного тока

AI1 для питания собственных нужд (12 IGBT-транзисторов);

- сетевой преобразователь TR2 и прерыватель тормозного резистора Br2 (10 IGBT-транзисторов);

- трехфазный тяговый инвертор TI2 и трехфазный инвертор AI2 собственных нужд (12 IGBT-транзисторов).

Вторая модификация четырехмодульного преобразователя базовой конструкции была сделана для проекта электровоза ALP-46A компании New Jersey Transit (США). Этот четырехосный электровоз с максимальной мощностью на ободе 5600 кВт рассчитан на работу от двух систем тягового электроснабжения переменного тока напряжением 12 и 25 кВ.

Компоновочная электрическая схема преобразователя для электровоза ALP-46A представлена на рис. 7. В этом проекте суть модификации состояла во введении в тяговый преобразователь базовой компоновки двух трехфазных инверторов для питания собственных нужд электровоза и электрической магистрали поезда.

Функционально четыре силовых модуля распределены следующим образом:

- сетевой преобразователь TR1 и прерыватель цепи защиты промежуточного звена от перенапряжений ROVP (9 IGBT-транзисторов);

- один трехфазный инвертор AI для питания собственных нужд и магистрали поезда (6 IGBT-транзисторов);

- два трехфазных инвертора AI для питания собственных нужд и магистрали поезда (12 IGBT-транзисторов);

- два трехфазных тяговых инвертора TI (12 IGBT-транзисторов).

Для размещения необходимого количества фильтровых конденсаторов корпус преобразователя для электровоза ALP-46A был удлинен на 200 мм по сравнению с базовым проектом.

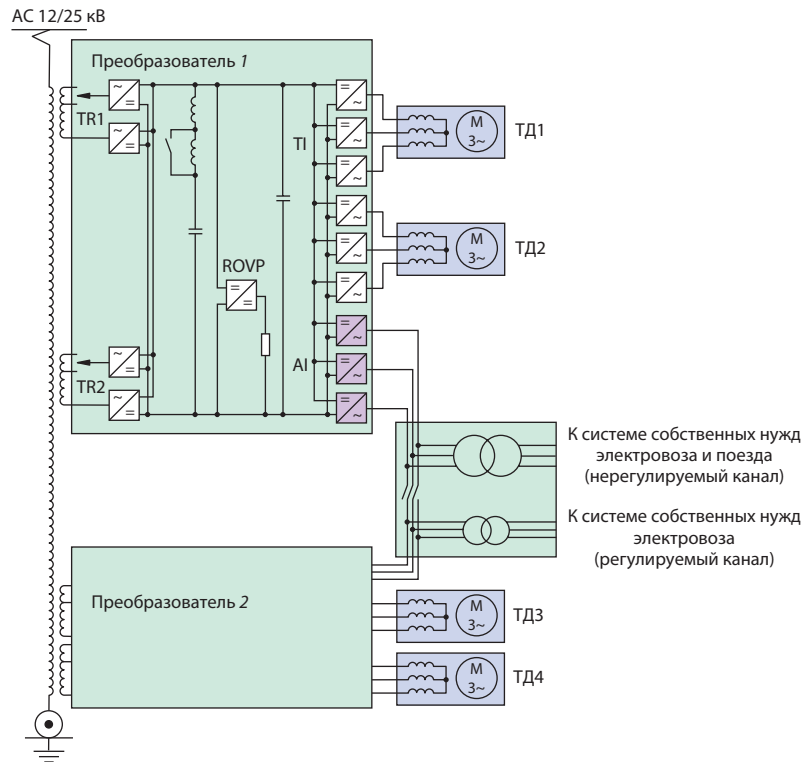


Рис. 7. Упрощенная схема силовых цепей электровоза ALP-46A

Для мощных шестиосных грузовых электровозов переменного тока HXD3B (рис. 8), которые совместно создавали для железных дорог Китая компании Dalian Locomotives и Bombardier, была разра-

ботана специальная трехмодульная модификация тягового преобразователя семейства MITRAC TC3300 (рис. 9).

Электровоз HXD3B имеет осевую мощность на ободе 1600 кВт.



Рис. 8. Электровоз HXD3B для железных дорог Китая



Рис. 9. Общий вид тягового преобразователя для электровоза HXD3B

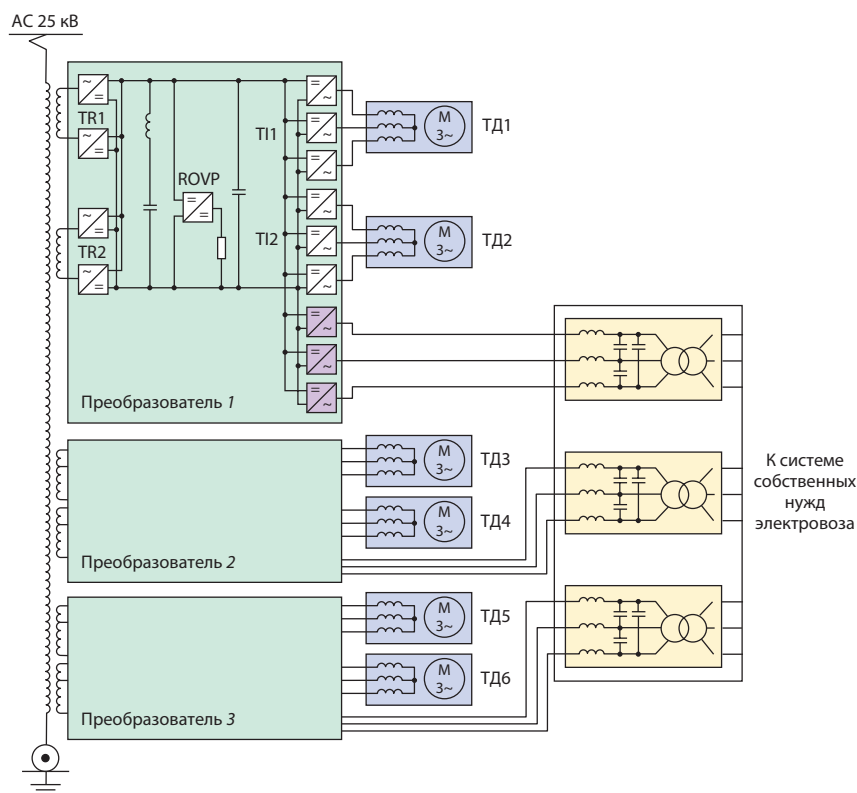


Рис. 10. Упрощенная схема силовых цепей электровоза HXD3B

Обеспечить питание трех тяговых двигателей такой мощности от одного преобразователя с габаритами базового варианта практически невозможно в основном из-за недостатка объема для размещения необходимого количества фильтровых конденсаторов. С учетом этого для шестисосного электровоза HXD3B разработали компоновку силовых цепей с тремя независимыми каналами питания трех тяговых двигателей и тремя трехмодульными тяговыми преобразователями (рис. 10).

Функционально три силовых модуля в каждом из трех независимых каналов распределены следующим образом:

- сетевой преобразователь TR1, прерыватель цепи защиты промежуточного звена от перенапряжений ROVP и одна фаза трехфазного инвертора собственных нужд (11 IGBT-транзисторов);
- сетевой преобразователь TR2 и две другие фазы трехфазного инвертора собственных нужд (10 IGBT-транзисторов);
- два трехфазных тяговых инвертора T11 и T12 (12 IGBT-транзисторов).

Габаритные размеры преобразователя для электровоза HXD3B — 2300×2030×1050мм.

Масса преобразователя с охлаждающей жидкостью составляет около 2000 кг.

Компания Bombardier также производит четырехосные магистральные тепловозы для грузового и пассажирского движения. С целью максимальной унификации конструкции кузова и технологии сборки четырехосных магистральных электровозов и тепловозов семейства TRAXX разработана компоновка кузова с боковым продольным проходом, при котором место в центре кузова предусмотрено либо для дизель-генераторной установки тепловоза, либо для единого тягового преобразователя электровоза (рис. 11).

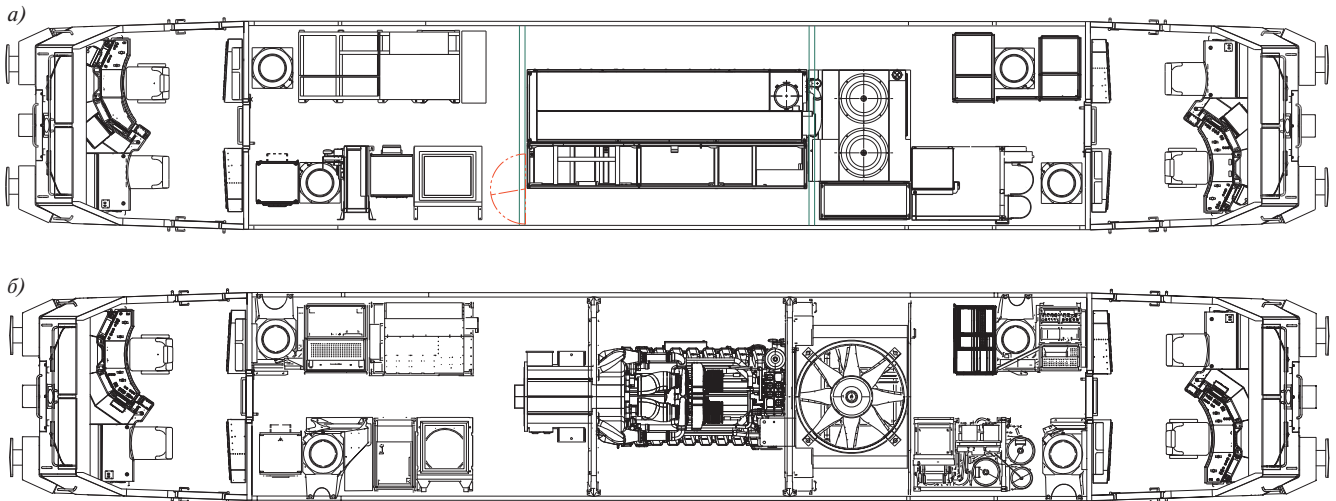


Рис. 11. Унификация компоновки локомотивов семейства TRAXX с боковым проходом: *а* – электровоз; *б* – тепловоз

Для такой компоновки кузова электровоза была создана серия модификаций тяговых преобразователей, где все силовые модули и другие необходимые элементы расположены в едином корпусе (рис. 12).

В этом преобразователе основные элементы расположены зеркально симметрично. Системные переключатели и контакторы размещены в центральной части. Две идентичные группы по три силовых модуля находятся слева и справа.

Силовые схемы многосистемного электровоза с боковым проходом на переменном и постоянном токе полностью повторяют базовый проект, представленный на рис. 4. Однако в данной модификации необходимое число силовых полупроводниковых приборов в расчете на одну тележку электровоза (два тяговых двигателя) размещено не в четырех, а в трех силовых модулях.

Это стало возможным благодаря тому, что сетевые преобразователи в этой модификации выполнены с двумя параллельными IGBT-транзисторами в плече, в то время как базовый вариант предусматривает три параллельных IGBT в плече. Исследования реальных токовых нагрузок тяговых преобразователей в эксплуатации и их влияния

на срок службы IGBT-транзисторов показали, что применительно к типичным режимам работы электровозов на железных дорогах большинства стран Западной Европы такой подход допустим.

Функционально три силовых модуля распределены следующим образом:

- один сетевой преобразователь и прерыватель цепей тормозного резистора (10 IGBT-транзисторов);

- второй сетевой преобразователь и однофазный инвертор для питания собственных нужд (10 IGBT-транзисторов);

- два трехфазных тяговых инвертора (12 IGBT-транзисторов).

Габаритные размеры преобразователя для электровозов с боковым проходом — 4000×2030×1050 мм. Масса преобразователя с охлаждающей жидкостью составляет около 4500 кг.

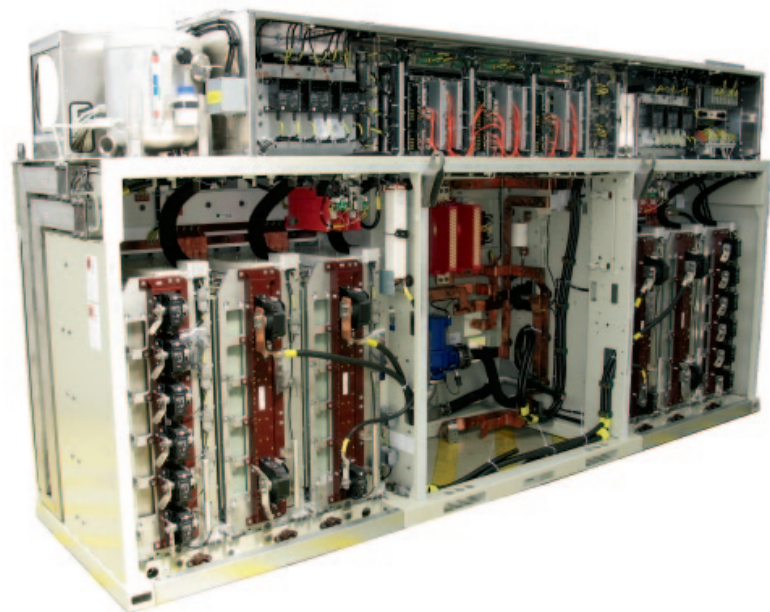


Рис. 12. Общий вид тягового преобразователя многосистемного электровоза TRAXX с боковым проходом



Рис. 13. Электровоз S 253 железных дорог Испании

Эта же концепция модификации тягового преобразователя реализована в проекте грузовых электровозов постоянного тока S 253 (рис. 13), крупная партия которых была заказана железными дорогами Испании.

В отличие от многосистемных электровозов с центральным и боковым проходами, где на постоянном токе использована схема с входными понижающими импульсными преобразователями, на электровозах S 253 постоянно го тока применена схема прямого

включения инверторов (рис. 14). Это позволило сократить число силовых модулей в схеме электровоза с шести до четырех. Однако в этом проекте конструкцию единого корпуса преобразователя оставили неизменной, чтобы полностью сохранить унифицированную компоновку оборудования в кузове. Лишние силовые модули были удалены, при этом в схему единого преобразователя дополнительно ввели два трехфазных инвертора для питания системы собственных нужд.



Рис. 15. Тепловоз серии 246 компании-оператора Metronom

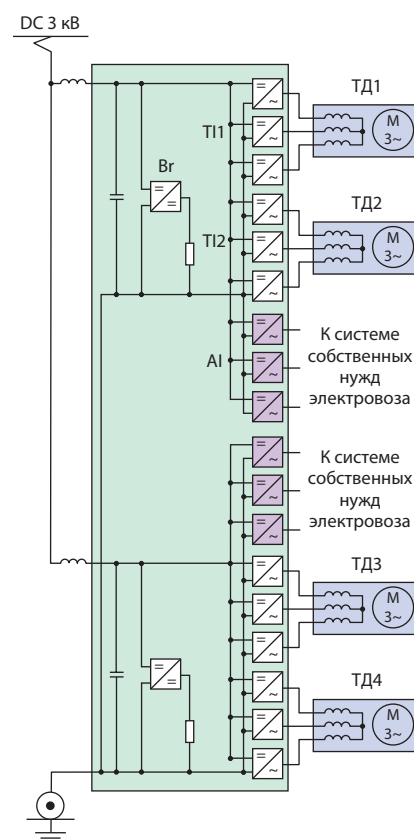


Рис. 14. Упрощенная схема силовых цепей электровоза S 253

Функционально два силовых модуля распределены следующим образом:

- прерыватель цепей тормозного резистора Br и трехфазный инвертор AI для питания собственных нужд (8 IGBT-транзисторов);
- два трехфазных тяговых инвертора TI1 и TI2 (12 IGBT-транзисторов).

Для тепловозов (рис. 15) на основе унифицированных модулей и технических решений семейства MITRAC TC3300 разработана максимально компактная и простая модификация тягового преобразователя (рис. 16).

Такой преобразователь рассчитан на питание четырех тяговых двигателей, суммарная мощность которых на ободу составляет 1800 кВт. От каждого из двух отдельных инверторов питаются два тяговых двигателя, включенных параллельно (рис. 17).



Рис. 16. Общий вид тягового преобразователя тепловоза серии 246

Функционально три силовых модуля распределены следующим образом:

- диодный выпрямитель GI и два прерывателя цепей тормозных резисторов Br1 и Br2 (6 диодных сборок и два IGBT-транзистора);
- трехфазный тяговый инвертор TI1 и трехфазный инвертор AI1 собственных нужд (12 IGBT-транзисторов);
- трехфазный тяговый инвертор TI2 и однофазный мостовой инвертор AI2 для питания цепи отопления поезда (10 IGBT-транзисторов).

Габаритные размеры преобразователя для тепловозов — 1500×2023×1050 мм.

Масса преобразователя с охлаждающей жидкостью составляет около 1300 кг.

Относительно низкая мощность тепловозов в сравнении с электровозами позволила уменьшить номинальное напряжение в промежуточном звене преобразователя с 2800 до 1800 В постоянного тока. В связи с этим в преобразователях для тепловозов использованы IGBT-транзисторы 33-го класса с предельно допустимым длительным прямым постоянным током 1200 А.

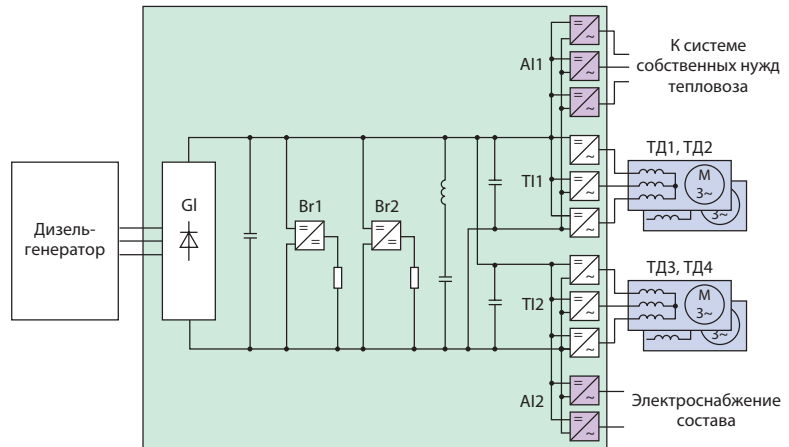


Рис. 17. Упрощенная схема силовых цепей тепловоза серии 246

Уникальным проектом компании Bombardier последних лет стал скоростной пассажирский локомотив комбинированного питания ALP-45DP (рис. 18) для железнодорожных компаний New Jersey Transit (США) и AMT (Канада).

Комбинированный четырехосный локомотив ALP-45DP предназначен для вождения скорых пассажирских поездов с максимальной скоростью до 200 км/ч. Он может работать как многосистемный электровоз переменного тока

(25 кВ/60 Гц и 12 кВ/25 Гц) с максимальной мощностью на ободе 4000 кВт и как тепловоз с суммарной мощностью двух дизельных агрегатов 3200 кВт. Масса локомотива — около 130 т.

На рис. 19 представлена упрощенная схема силовых цепей локомотива ALP-45DP. Как видно, она во многом повторяет цепи электровозов переменного тока ALP-46А (см. рис. 7). Разница состоит в дополнительной возможности питания преобразователей от двух асин-



Рис. 18. Комбинированный локомотив ALP-45DP

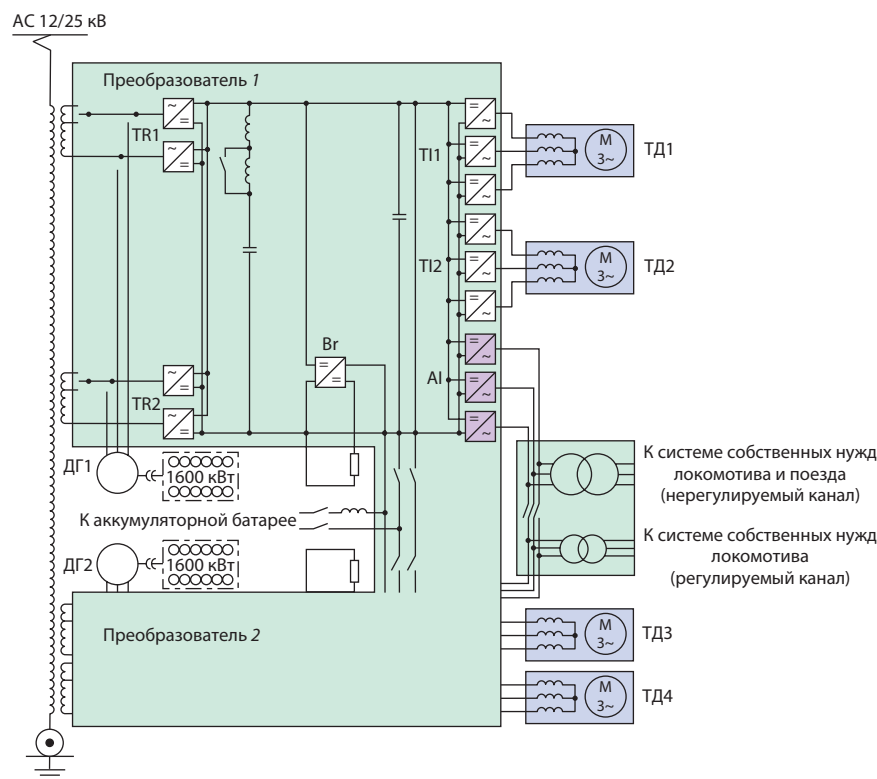


Рис. 19. Упрощенная схема силовых цепей комбинированного локомотива серии ALP-45DP:
ДГ — дизель-генераторный агрегат

хронных генераторов, вращаемых двумя дизелями.

Для оптимизации размещения оборудования в кузове локомотива была выбрана компоновка тягового преобразователя в едином корпусе аналогично варианту, показанному на рис. 12. Этот тяговый преобразователь состоит из двух идентичных комплектов, каждый из которых содержит три силовых модуля. Функционально эти три модуля (для одной части преобразователя) распределены следующим образом:

- сетевой преобразователь TR1, прерыватель цепи тормозного резистора Br, одна фаза преобразователя собственных нужд AI (11 IGBT-транзисторов);

- сетевой преобразователь TR2 и две другие фазы преобразователя собственных нужд (12 IGBT-транзисторов);

- два трехфазных тяговых инвертора TI1 и TI2 (12 IGBT-транзисторов).

Габаритные размеры преобразователя для электровозов с боковым проходом — 4000×2020×1050 мм. Масса преобразователя с охлаждающей жидкостью составляет около 4350 кг.

Таким образом, на сегодняшний день семейство тяговых преобразователей высокой мощности MITRAC TC3300 для локомотивов уже достаточно разнообразно. Перечисленные проекты преобразо-

вателей не исчерпывают всего перечня модификаций. В рамках каждого из представленных компоновочных вариантов для различных проектов локомотивов имели место и другие функциональные модификации. В целом на начало 2010 г. в производстве находилось 14 видов исполнений.

Вместе с тем очевидно, что в модификациях преобразователей существенно различаются только размеры корпусов. Все остальные компоненты практически полностью унифицированы. Это позволяет для каждого конкретного проекта локомотива формировать оптимальную по стоимости и массогабаритным показателям компоновку силовых цепей и преобразователей и, в конечном счете, всегда предлагать заказчикам конкурентоспособную, качественную и хорошо отработанную продукцию. С другой стороны, высокий уровень унификации компонентов позволяет увеличить объемы их производства и таким образом дополнительно снизить их стоимость и повысить качество.

Серийное производство тяговых преобразователей семейства MITRAC TC3300 в настоящее время осуществляется на заводах компании Bombardier в городах Мангейм (Германия) и Трапага (Испания), а также на производственной площадке совместного предприятия Bombardier Transportation и китайской компании CPC в Чанчжоу (Китай).

Разработки в компании Bombardier новых модификаций тяговых преобразователей высокой мощности семейства MITRAC TC3300 для новых проектов локомотивов успешно продолжаются.