

# Современная силовая электроника в схемах тяговых преобразователей

*Тяговые преобразователи на базе современных компонентов силовой электроники в сочетании с трехфазными асинхронными тяговыми двигателями обеспечивают новые возможности как в повышении силы тяги, так и в снижении мешающего влияния электрической тяги на питающие сети. Значительный качественный скачок в области тягового привода был реализован на этапе широкого внедрения силовых запираемых тиристорных (GTO). Более компактным и надежным биполярным транзистором с изолированным затвором (IGBT) удалось заметно ослабить позиции GTO-тиристорных и занять ведущее место в современных системах трехфазного асинхронного тягового привода.*

Тяговые системы электрического тягового подвижного состава большой мощности достигли в настоящее время высокого технического уровня. Несмотря на то что трехфазный тяговый привод начал использоваться сравнительно давно, наибольшее развитие он получил с появлением запираемых тиристорных, а затем и транзисторных IGBT. Преобразователи стали более легкими и компактными, уменьшились их потери мощности, повысилась тактовая частота, снизились цены.

В настоящее время к системам тягового привода предъявляются более высокие требования. Системы на базе современных компонентов силовой электроники заняли ведущее место в преобразовательной



Рис. 1. Электровоз серии 151 (фото: DBAG, Яцбек)

технике, которая относится к диапазону мощностей, измеряемых в мегаваттах.

Одной из ведущих компаний в мире, работающих в области тягового привода для магистрального подвижного состава, является Bombardier Transportation, накопившая и широко использующая опыт своих предшественников — компаний Adtranz, ABB Henschel, ABB и BBC.

## Этапы развития тягового привода для системы переменного тока частотой 16,7 Гц

Процесс развития систем тягового привода переменного тока можно разделить на несколько этапов. Первый из них, начавшийся в 1910 г. и длившийся почти до 1990 г., базировался на использовании тяговых двигателей однофазного тока с последовательным возбуждением.

### Привод с тяговыми двигателями однофазного переменного тока последовательного возбуждения

Тяговые двигатели этого типа характеризовались низким уровнем искрообразования на коллекторе во всем диапазоне изменения частоты вращения благодаря низкой частоте коммутуемого тока, равной 16,7 Гц, и применению схемы Бен-Эшенбурга для шунтирования обмотки возбуждения. Для регулирования напряжения и, следовательно, частоты вращения и вращающего момента разработаны различные методы, представлявшие собой варианты схем переключения отпаек трансформатора под нагрузкой с минимальными скачками напряжения. Сюда можно отнести контакторные схемы со сглаживающими и токораспределяющими дросселями, кулачковые контроллеры с устройствами плавного регулирования и, наконец, высоковольтные контроллеры с тиристорными переключателями или регуляторами.

При использовании высоковольтных контроллеров с относительно плавным регулированием напряжения значительно повышалась стоимость трансформатора. В 1960-е годы с началом использования тиристорных переключателей началась эпоха применения в схемах тягового привода элементов силовой электроники.

На данном этапе эти новые элементы использовались в сочетании с электромеханическими кон-

тактными системами и получили довольно широкое распространение, в частности, на электровозах бывших Государственных железных дорог Германии (DB) серий E 10, E 40, E 50, а затем и BR 111, BR 151 (рис. 1), BR 103. Такие тиристорные регуляторы с 1974 г. стал выпускать комбинат LEW Hennigsdorf в бывшей ГДР.

Эти регуляторы обеспечивали плавный переход между ступенями, несмотря на достаточно большую разность напряжений между ними, составляющую 500 В. Эти регуляторы до сих пор используются на электровозах железных дорог Германии (DBAG) серий 155, 143 и 112.

#### *Системы с тяговыми двигателями пульсирующего тока*

Плавное регулирование напряжения без применения контроллеров начали внедрять с 1970 г., когда стали появляться тиристоры все более высокой мощности. В этих схемах регулируемые тиристорные выпрямители питают тяговые двигатели пульсирующего тока через сглаживающие дроссели. Эти двигатели постоянного тока последовательного возбуждения при коммутировании тока нечувствительны к наличию в нем значительных пульсаций благодаря шунтированию обмотки возбуждения резисторной цепочкой. Для того чтобы в режиме небольших нагрузок избежать чрезмерной загрузки питающей сети реактивной мощностью и значительного искажения кривой тока, используют несколько полууправляемых тиристорно-диодных мостовых выпрямителей, включенных последовательно. Реализация рекуперативного торможения в этой тяговой системе вряд ли возможна, так как здесь потребовалось бы применять полностью управляемые выпрямительные мосты и специальные схемы защиты, предотвращающие опрокидывание используемых для рекуперации инверторных схем.

На сети DB система с двигателями пульсирующего тока применяется с 1972 г. в электропоездах серии 420 городских железных дорог (рис. 2). Кроме того, она была реализована на двухсистемном электровозе серии 181. В Австрии эта система использована на электровозе серии 1044 мощностью 5,6 МВт, развивающей скорость до 160 км/ч.

#### *Трехфазный асинхронный привод*

**Системы на базе быстродействующих тиристоров.** Классическая система асинхронного трехфазного привода базируется на использовании идеального для тяги бесколлекторного трехфазного двигателя, питаемого схемой, состоящей из инвертора (WR), промежуточного звена постоянного напряжения и сетевого четырехквадрантного регулятора (4QS),



Рис. 2. Электропоезда серии 420 на городской железной дороге Мюнхена (фото: DBAG, Эмерслебен)

обеспечивающего возможность рекуперативного торможения и не оказывающего негативного влияния на питающую сеть. Эта схема была в свое время разработана компанией BBC.

В 1980 г. на базе этой техники был построен первый опытный электровоз серии 120 с асинхронным трехфазным приводом, а в 1987 г. уже начался выпуск серийной партии численностью 60 ед. (рис. 3).

После этого для Государственных железных дорог Дании (DSB) была построена партия электровозов подобного типа серии EA 3000, а также несколько высокоскоростных поездов ICE1, концевые моторные вагоны которых фактически представляли собой отдельные электровозы с тяговым приводом электровоза серии 120.

Для реализации тягового преобразователя с регулятором 4QS и импульсным инвертором напряжения потребовалось применение быстродействующих тиристоров с дополнительными вентилями и контурами для принудительного коммутирования. В тот период промышленность располагала быстродействующими тиристорами на рабочее напряжение 1400 В.

Для создания промежуточного звена с напряжением постоянного тока 2800 В нужно было использовать схемы, содержащие цепочки из четырех последовательно соединенных тиристоров. Это позволяло включать такие цепочки параллельно как в сетевом регуляторе 4QS, так и в схеме инвертора. В результате получалась достаточно сложная схема.

Система управления, построенная на дискретной базе, также получилась сложной. Результатом этого стал большой уровень затрат, необходимых для обеспечения надежной работы системы управления и силовой схемы.

**Внедрение системы на запираемых тиристорах.** В 1980-х годах все больше стали применяться в цепях управления микропроцессорные схемы. Они обладали компактностью и повышенной надежностью. В



Рис. 3. Электровоз серии 120 (фото: DBAG, Вебер)

этот же период в Японии был изобретен запираемый тиристор (GTO), позволивший значительно упростить схемы тяговых преобразователей.

Компания BBC на базе имевшихся запираемых тиристоров с рабочим напряжением 2500 В разработала тяговый преобразователь для первого электровоза с промежуточным звеном на напряжение 1400 В. Начиная с 1987 г. железнодорожной компании VT/SZU в Швейцарии было поставлено 8 электровозов серии Re 450, разработанных на базе этого преобразователя, а с 1989 г. — 115 таких же локомо-

тивов для Федеральных железных дорог Швейцарии (SBB) и городской железной дороги Цюриха.

В конце 1980-х годов появились тиристоры GTO с запирающим напряжением 4500 В и током 3000 А, пригодные для использования в тяговых преобразователях высокой мощности, имеющих промежуточное звено напряжением 2800 В и выше. Электровоз, получивший наименование Lok 2000 (Re 460) и разработанный на базе преобразователя с мощными тиристорами GTO, построен для SBB и имеет мощность 6,1 МВт (рис. 4). Его тяговая цепь построена



Рис. 4. Электровоз серии Re 460 Федеральных железных дорог Швейцарии (фото: SBB)

по трехточечной схеме и содержит по 12 тиристорov ГТО в каждом инверторе.

С созданием новой серии высокоскоростных поездов ICE1 (1989/1990 г.), электропоезда IC 70 Государственных железных дорог Норвегии (NSB) и локомотива Euroshuttle серии CL 7000 (1992 г.) началось использование тяговых преобразователей на запираемых тиристорах компаниями Siemens и Bombardier (ABB). Преобразователи их разработки имеют промежуточное звено напряжением 2800 В, построены по двухточечной схеме на тиристорах с рабочим напряжением 4,5 кВ (шесть тиристорov на один инвертор без последовательного соединения вентиляей). При этом применяются демпферные, или снабберные, цепи Марквардта — Унделанда.

Преобразователи на тиристорах ГТО с рабочим напряжением 4,5 кВ, построенные по двухточечной схеме с промежуточным звеном на напряжение 2,8 кВ, стали для компаний Siemens и Bombardier стандартными и нашли широкое распространение на серийном тяговом подвижном составе, выпускавшемся в первые годы XXI века.

В ряде случаев использовались запираемые тиристоры с рабочим напряжением 6,5 кВ. На них строились преобразователи, подключаемые непосредственно к контактной сети постоянного тока напряжением 3,3 кВ. Однако здесь им на смену пришли схемы на транзисторах IGBT, также рассчитанные на запирающее напряжение 6,5 кВ.

Схемы с жестко управляемыми тиристорами ГТО, которые в статических преобразователях тягового электроснабжения допускают последовательное соединение вентиляей, в тяговых преобразователях на европейской сети не нашли применения.

**Преобразователи на транзисторах IGBT.** На первом этапе внедрения эти элементы силовой электроники применяли в схемах преобразователей, питающих вспомогательные устройства тягового подвижного состава. В дальнейшем их стали применять для тяговых преобразователей легких, а затем и тяжелых моторвагонных пригородных поездов, на электропоездах городских железных дорог (серий 423.2 с 2002 г.) и, наконец, на электровозах большой мощности (Euroshuttle, а также серий 189 с 2002 г. (рис. 5), 185.2 с 2003 г. и Re 484 для сети SBB с 2004 г.).

### Технология ГТО

ГТО является тиристором со слабо разветвленной структурой управляющего электрода (затвора). Для включения тиристора от блока управления на затвор подается ток управления величиной в несколько ампер. Для запираения ГТО через контакт затвора необходимо пропустить достаточно большой



Рис. 5. Многосистемный электровоз серии 189 (фото: DBAG, Вебер)

ток, достигающий 20 % разрываемого (анодного) тока. После завершения рекомбинации носителей заряда затвор становится высокоомным, и схема управления тиристором поддерживает на нем напряжение около –15 В для обеспечения надежного запираения.

Высокое сопротивление цепи затвор — катод служит для схемы управления подтверждением запертого состояния тиристора. Сигналы управления и контроля передаются по двум волоконно-оптическим кабелям. Мощность блока управления порядка 30 Вт для одного тиристора обеспечивается общим для всех ГТО блоком питания с выходным напряжением  $\pm 48$  В, частотой 16 кГц, имеющим кривую прямоугольной формы. В схеме блока управления обеспечивается разделение потенциалов. Для его подтверждения проводится периодический контроль с использованием испытательного напряжения 11 кВ.

Стандартные тиристоры ГТО с запирающим напряжением 4500 В, рассчитанные на прямой ток 3000 или 4000 А, выполняются на базе кремниевого кристалла диаметром 75 или 85 мм и контактной системы. Диаметр корпуса тиристора составляет 108 или 120 мм. Электрический и термический контакты обеспечиваются силой прижатия между радиатором и корпусом порядка 4 т.

Обычно таблеточные тиристоры и вспомогательные силовые диоды вместе с радиаторами объединяют в общую сборку со стягивающим устройством, обеспечивающим указанную силу прижатия. Спиральные радиаторы охлаждаются в масле или полиэфире. Возможно также охлаждение с применением металлических радиаторов, имеющих водяную рубашку, где циркулирует деионизированная вода. Для того чтобы можно было применять для охлажде-

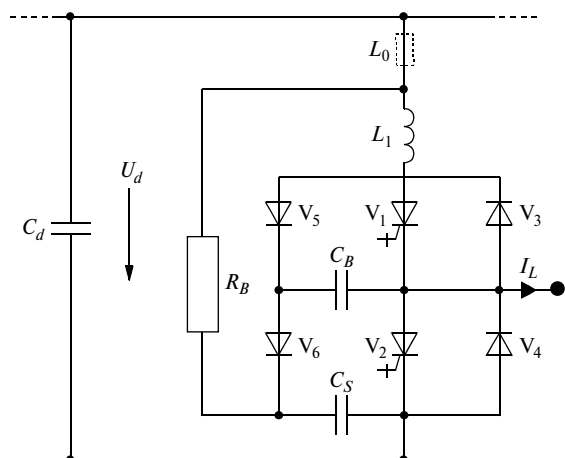


Рис. 6. Фаза преобразователя на тиристорах GTO с демпферной схемой Марквардта — Ундерланда

ния обычную водопроводную воду, используют радиаторы из нитрида алюминия (AlN).

Скорость нарастания тока при включении ограничивается величиной 500 А/мкс с помощью сглаживающих дросселей. Скачки напряжения при размыкании цепи снижаются с помощью безындуктивной конденсаторной батареи до величины 500 В/мкс, чтобы дать возможность тиристорам GTO полностью перейти в запертое состояние. Быстродействующие тиристоры (FGTO) допускают более быстрое отключение, поэтому для них используется конденсаторная батарея меньшей емкости. Ограничивающие дроссели и конденсаторы являются элементами демпферной цепи.

Постоянная времени демпферной цепи, обеспечивающая устойчивую коммутацию тиристорам GTO, должна быть в пределах 50 – 200 мкс. Поскольку пробивное напряжение GTO с увеличением температуры снижается, схема с параллельно включенными тиристорами была бы термически нестабильной. В связи с этим мощные запираемые тиристоры, применяемые в тяговых преобразователях, не следует соединять ни параллельно, ни последовательно.

В аварийных ситуациях, когда оба GTO одной фазы оказываются открытыми, ток возрастает настолько быстро и до таких значений, что попытка разрыва цепи может привести к разрушению тиристорам. Концепция защиты преобразователей на запираемых тиристорах основана на том, что в аналогичной ситуации остальные тиристоры регулируются таким образом, что обеспечивают контролируемое гашение излишков энергии, запасенной в промежуточном звене постоянного напряжения.

Для защиты преобразователя при пробое одной фазы предлагались также такие схемы защиты, которые не требуют перевода остальных тиристорам в режим регулируемого гашения энергии. Они срабаты-

вают на отключение преобразователя, однако для них необходимо наличие схемы ограничения мгновенного значения напряжения (MUB).

### Демпферные цепи GTO

Для облегчения процессов включения и запираания тиристорам демпферные цепи запасают энергию, которая затем при каждом коммутационном процессе должна отводиться и преобразовываться в тепло. На первом этапе демпферные цепи применяли для каждого тиристора GTO. При этом каждый коммутационный процесс одного из тиристорам сопровождался потерями энергии в демпферных цепях обоих GTO, образующих фазу. В дальнейшем были разработаны схемы, позволившие устранить этот недостаток.

Схема Марквардта — Унделанда показана на рис. 6. В этом виде она использована компанией Bombardier и ее предшественниками в схемах семейства тяговых преобразователей для электровозов DBAG серий 101, 145 и 185.1, EL 2000 (промышленный) компании Rheinbraun и ALP 46 американской компании New Jersey Transit.

Приведенная схема несимметрична. Общий для обоих GTO ( $V_1$  и  $V_2$ ) демпферный конденсатор  $C_B$  при отключении тиристора  $V_1$  действует на него непосредственно, а на тиристор  $V_2$  при его отключении — опосредованно, т. е. через накопительный конденсатор  $C_S$ , емкость которого должна быть в 5 раз больше, чем у  $C_B$ . Дроссель  $L_1$  при включении разгружает как  $V_1$ , так и  $V_2$ .

Потери  $P_{RB}$ , гасящиеся на резисторе  $R_B$  при тактовой частоте  $f_T$ , образуются из энергии, запасенной в конденсаторе  $C_B$  при напряжении промежуточного звена  $U_d$ , энергии в дросселе  $L_1$  и паразитной индуктивности  $L_0$  при мгновенном значении тока нагрузки  $I_L$ :

$$P_{RB} = f_T [1/2 C_B U_d^2 + 1/2 (L_0 + L_1) I_L^2].$$

В схеме с отдельными демпферными цепями для каждого GTO фигурирующая в уравнении величина  $C_B$  в три раза больше, чем в рассматриваемой цепи. При запираании одного GTO падения напряжения на дросселе  $L_1$  и паразитной индуктивности  $L_0$  создают перенапряжение в промежуточном звене.

В результате увеличения напряжения  $U_d$  вентиль дополнительно нагружается. В связи с этим нужно стремиться уменьшать  $L_0$  за счет максимального использования безындуктивных схемных элементов. Падение напряжения на  $L_1$  гасится резистором  $R_B$  и емкостью  $C_S$  при размагничивании дросселя. Оптимальное демпфирование уменьшает перенапряжения в промежуточном звене в течение того короткого времени, за которое происходит надежное запираание GTO, и обеспечивает плавное изменение тока в демпферных диодах  $V_5$  и  $V_6$ .

При выборе параметров дросселя  $L_1$  исходят не только из крутизны фронта нарастания тока, но также

из необходимости ограничения бросков тока при защитном отпирании тиристоров в аварийных режимах.

**Схема МакМуррея** является симметричной. Она разработана итальянской компанией Ansaldo и усовершенствована компанией Siemens, которая использовала ее в схеме тягового преобразователя с напряжением 2800 В в промежуточном звене. На рис. 7 показана такая схема для одной фазы. Демпферные конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  действуют совместно, поэтому параметру  $C_B$  в приведенном выше уравнении соответствует величина  $C_1 + C_2$ . Это же относится и к демпферной индуктивности  $L_1 + L_2$ .

Энергия, которая гасится на резисторе  $R_B$ , сравнима с этим же параметром рассмотренной ранее схемы Марквардта — Унделанда. Благодаря отсутствию конденсатора  $C_S$  экономятся затраты на демпферную цепь, уменьшается занимаемый ею объем, однако в этом случае необходимо обеспечить еще меньшую величину паразитной индуктивности  $L_0$  на тракте между фазой и промежуточным звеном, чем в предыдущей схеме.

**Примеры практического применения преобразователей на тиристорах GTO**

*Поезд серии 423.1 городской железной дороги*

Компании ABB Henschel и Adtranz, предшественники отделения тягового привода компании Bombardier, разработали семейство водоохлаждаемых тяговых преобразователей на запираемых ти-

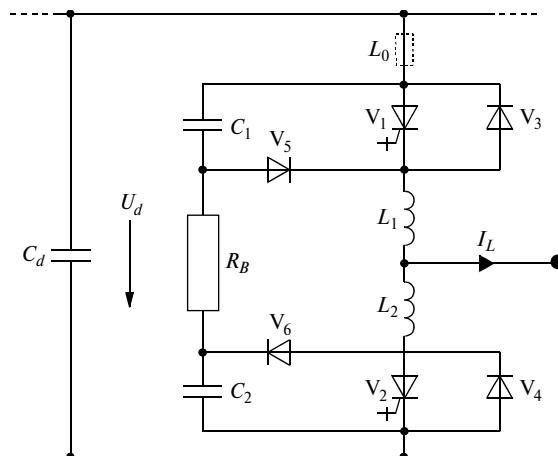


Рис. 7. Фаза преобразователя на тиристорах GTO с демпферной схемой МакМуррея

ристорах с демпферной цепью МакМуррея для тяжелых пригородных поездов. Во всех вариантах использовались стандартные GTO с запирающим напряжением 4,5 кВ и током 3000 А. После первого применения на поездах DT4 метрополитена Гамбурга (750 В постоянного тока) были созданы преобразователи для электропоездов серии 474 городской железной дороги Гамбурга (1200 В постоянного тока) и в 1999 г. — для поезда серии 423.1 городских железных дорог DBAG (15 кВ, 16,7 Гц, напряжение промежуточного звена 1800 В). Поезд оснащен двумя независимыми тяговыми преобразователями и трансформаторами, смонтированными под кузовами вагонов. На рис. 8 приведена принципиальная схема этого преобразователя.

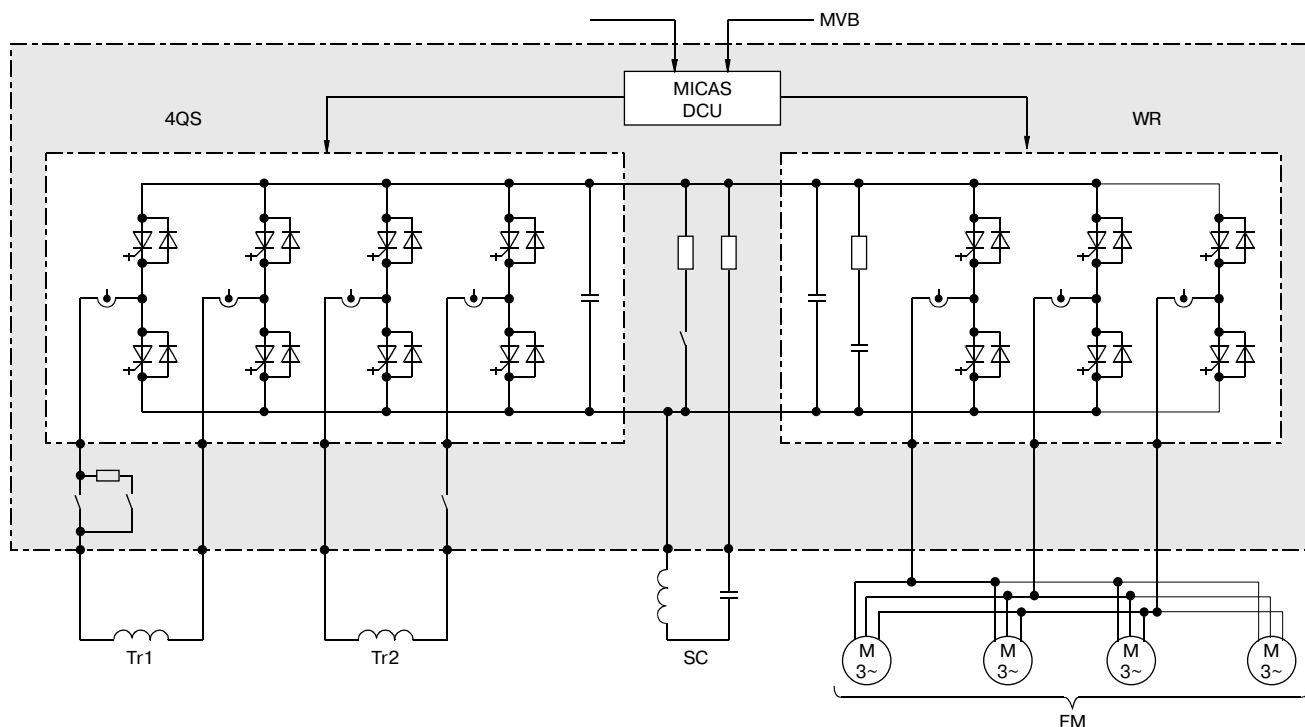
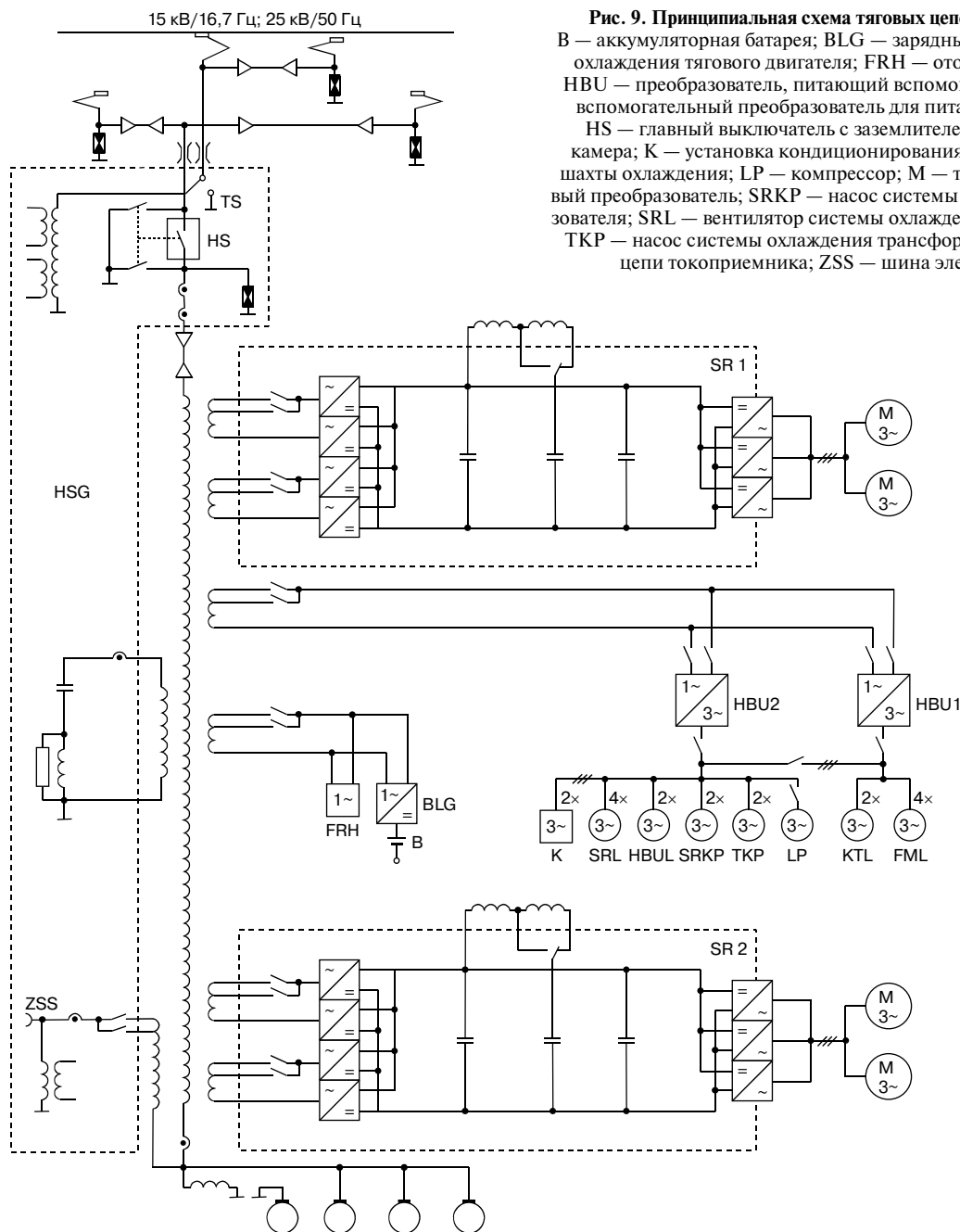


Рис. 8. Принципиальная схема тягового преобразователя электропоезда серии 423.1



**Рис. 9. Принципиальная схема тяговых цепей электровоза серии 185.1:**  
 В — аккумуляторная батарея; BLG — зарядный агрегат; FML — вентилятор охлаждения тягового двигателя; FRH — отопление кабины машиниста; HBU — преобразователь, питающий вспомогательные приводы; HBUL — вспомогательный преобразователь для питания привода вентиляторов; HS — главный выключатель с заземлителем; HSG — высоковольтная камера; К — установка кондиционирования воздуха; KTL — вентилятор шахты охлаждения; LP — компрессор; М — тяговый двигатель; SR — тяговый преобразователь; SRKP — насос системы охлаждения тягового преобразователя; SRL — вентилятор системы охлаждения тягового преобразователя; TKP — насос системы охлаждения трансформатора; TS — разъединитель цепи токоприемника; ZSS — шина электроснабжения поезда

Два сетевых четырехквadrантных регулятора 4QS, подключенных к тяговым обмоткам трансформатора Tr1 и Tr2 с напряжением 900 В, питают промежуточное звено постоянного напряжения ZK. От него получает питание импульсный инвертор WR, к которому подключены четыре асинхронных трехфазных тяговых двигателя FM. Схемные компоненты четырех фаз регулятора 4QS и трех фаз инвертора вместе с частью конденсаторов промежуточного звена смонтированы в отдельные блоки (SRBG). Часть конденсаторов промежуточного звена подключена через демпферные резисторы, чтобы предотвратить возникновение резонансов и ограничить скачки тока при аварийном открытии тиристоров. Каждый блок

SRBG содержит один трансформатор напряжения, по одному трансформатору тока на фазу и схему контроля аварийного отпирания тиристоров.

Схема каждой фазы в основном соответствует приведенной на рис. 7. Дополнительные короткозамыкающие тиристоры здесь не используются. В случае если оба тиристора одной фазы окажутся открытыми или если напряжение промежуточного звена станет выше 2800 В, происходит принудительное открытие всех GTO, в результате чего энергия промежуточного звена гасится.

Фазовый модуль содержит тиристорно-диодную сборку (вентили  $V_1 - V_6$ ), дроссели  $L_1$  и  $L_2$ , а также демпферные резисторы, помещенные между двумя



водяными охлаждающими радиаторами из нитрида алюминия. В электрически надежно изолированных и термически хорошо проводящих радиаторах циркулирует смесь воды с гликолем. Отводимое тепло потерь может использоваться для отопления пассажирских салонов.

Блок SRBG сетевого регулятора имеет компактную конструкцию. В его нижней части размещены блоки защиты GU, выше расположены фазные модули с трансформаторами тока, а наверху — конденсаторы промежуточного звена. Они образуют единую конструкцию с ошиновкой, что обеспечивает минимальную паразитную индуктивность.

Блок SRBG инвертора имеет такие же габариты, как и блок регулятора, а излишек пространства, возникший за счет меньшего числа фазных модулей, использован для размещения демпферных резисторов промежуточного звена.

Кроме регуляторов 4QS и тяговых инверторов, блоки SRBG содержат преобразователь и дополнительные схемные компоненты для заряда и разряда промежуточного звена, а также устройства системы управления MICAS-S, которые с помощью информационной шины MVB соединены с периферийным оборудованием. Поглощающая цепь SG, предназначенная для подавления второй гармоники (33 Гц), размещена вне блоков SRBG.

Базой при создании тягового преобразователя для электровоза серии 185.1 послужил преобразователь электровоза серии 101, позволяющий осуществлять индивидуальное регулирование тяговых двигателей. На его основе были созданы преобразователи для электровозов DBAG серий 185, 145 (4,2 МВт) с групповым питанием двигателей, для промышленного электровоза серии EL 2000 компании Rheinbraun.

Мощность электровоза серии 185 составляет 5,6 МВт при максимальной скорости 140 км/ч. Кроме того, он имеет двухсистемное исполнение (15 кВ, 16,7 Гц; 25 кВ, 50 Гц). Этот локомотив был принят компанией Bombardier в качестве платформы для создания семейства электровозов, которое получило обозначение TRAXX F140 AC1. Как видно из рис. 9, схема преобразователя содержит выключатели тяговых обмоток трансформатора и поглощающей цепи. Этим, а также использованием быстродействующих тиристоров GTO преобразователь электровоза серии 185 отличается от преобразователя, используемого на BR 145.

Благодаря применению быстродействующих GTO и требуемой в связи с этим небольшой емкости демпферной цепи удалось реализовать мощность 5,6 МВт для электровозов платформы TRAXX F140 AC1, а именно серии 185.1 (DBAG), Re 482 (SBB), Re 485 (BLS), и платформы TRAXX P160 AC1, к которой относится электровоз серии 146 с максимальной скоростью 160 км/ч.

Показанный на рис. 9 сетевой фильтр, который размещается в высоковольтной камере электровоза, подключен к обмотке трансформатора напряжением 1000 В, если напряжение в контактной сети 15 кВ, и 1670 В при напряжении в сети 25 кВ. Этот фильтр обеспечивает подавление мешающих токов, возникающих при работе преобразователя на локомотиве и искажающих форму кривой напряжения. При этом также подавляются резонансы в питающей сети. Такая концепция фильтра принята на локомотивах серий 101, 145, 146, 185 и других, относящихся к семейству TRAXX компании Bombardier.

Фазы тягового преобразователя выполнены в соответствии со схемой, показанной на рис. 6. Они, как и тяговый трансформатор, охлаждаются экологичным полиэфиром. Три фазы тягового инвертора, образующие блок SRBG, называемый также преобразовательным модулем, помещены в герметичный литой контейнер из алюминиевого сплава. Здесь также каждая фаза снабжена отдельным трансформатором тока и схемой, реагирующей на защитное отпирание всех тиристоров. На задней стенке контейнера расположены быстродействующие запирающие устройства, которые разрывают и запирают линию охлаждения при выдвигании блока из силового шкафа и отпирают после ее замыкания при вдвигании блока. Охлаждающая жидкость проходит сначала через спиральный радиатор, находящийся в непосредственном контакте с таблеточным тиристором, затем попадает в рабочий объем, в котором охлаждается дроссель демпферной схемы. Перед тем как попасть во внешний трубопровод, жидкость охлаждает расположенные в контейнере резисторы демпферной схемы.

Для реализации на тиристорах GTO сетевого регулятора 4QS используется аналогичная схема, но без средней фазы. На электровозе в шкафу тягового преобразователя блоки SRBG размещаются в нижней части справа и слева. Они соединяются безындуктивной ошиновкой с конденсаторами промежуточного звена, расположенными над ними. На том же уровне размещены конденсаторы поглощающей цепи. В нижней части между блоками SRBG смонтированы переключающие контакторы и токоподводы. В верхней части шкафа находятся гасящие резисторы, над которыми также размещены часть конденсаторов промежуточного звена и интегрированный блок управления ISG.

Преобразователи этого семейства не требуют ни дополнительных короткозамыкающих тиристоров, ни ограничителей мгновенного значения напряжения (MUB).

Блоки SRBG с напряжением промежуточного звена 2800 В реализованы для семи видов тяговых преобразователей. По состоянию на вторую половину 2005 г. всего было изготовлено около 4 000 таких блоков.



## Технология IGBT

Биполярные транзисторы IGBT представляют собой электронные приборы, управляющие величиной электрического поля, действующего между изолированным затвором и эмиттером. Для его регулирования требуется небольшой ток, позволяющий заряжать или разряжать емкость затвора. Крутизну возрастания или прерывания тока при отпирании или запираании транзистора — коллектор можно регулировать прикладываемым к затвору напряжением.

Для IGBT не требуются демпферные цепи, однако здесь приходится учитывать коммутационные потери, возникающие при одновременном изменении напряжения и протекающего тока. Время переключения мощного транзистора IGBT составляет 1–2 мкс. Большинство изготовителей выпускают IGBT, не требующие демпферных цепей. Благодаря этому схема тяговых преобразователей значительно упрощается по сравнению с системой на запираемых тиристорах. Исключения составляют несколько разработок, в которых использованы IGBT в сочетании с простейшими демпферными цепями.

Падение напряжения на открытом транзисторе IGBT при протекании полного тока составляет 4 В. Это несколько больше, чем на тиристорах ГТО. Тем не менее, несмотря на более высокую тактовую частоту, потери во всем диапазоне от холостого хода до максимального тока у преобразователей на IGBT ниже, чем у преобразователей на ГТО, так как у них отсутствуют пропорциональные нагрузке потери в демпферных цепях.

При токовой перегрузке транзистора IGBT падение напряжения на нем может значительно превысить 4 В. В результате возможно разрушение полупроводниковой структуры под действием возросшей мощности потерь. Для защиты IGBT от перегрузок используется блок GDU, который контролирует величину тока в цепи эмиттер — коллектор и в критической ситуации дает команду на запирацию. Таким образом, здесь используется принцип защиты, обратный применяемому в преобразователях на тиристорах ГТО, где при перегрузке происходит полное отпирание всех тиристоров.

Для защиты IGBT от перенапряжений служат нагрузочные резисторы, включаемые в его цепь.

В случае включения транзисторов IGBT параллельно схема остается термически стабильной. Такое включение используется при особо высоких мощностях. При симметрии импедансов параллельных ветвей ток в транзисторах распределяется равномерно.

В конструкции преобразователей на IGBT используется модульный принцип. Здесь не требуется объединение вентиля в сборки со стяжкой, как в случае таблеточных тиристоров. Транзисторы обладают достаточной изоляцией, в том числе и относи-

тельно системы охлаждения. В связи с этим конструкция блока SRBG существенно упрощается. IGBT-модули классов напряжения 1700 В (облегченные поезда местного сообщения с напряжением сети 750 В), 3300 В (тяжелые пригородные поезда, напряжение контактной сети до 1500 В) и 6500 В (мощный магистральный подвижной состав на напряжение до 3,3 кВ) соответствуют европейским стандартам. Компания Bombardier выпускает модули IPM класса 4500 В (напряжение промежуточного звена 2,8 кВ) с интегрированным водяным охлаждением и прибором защиты GDU.

Внутри модуля полупроводниковые кристаллы включены параллельно с помощью соединителей из специальной легированной проволоки. Устойчивость модулей к термоциклированию и электрическая прочность при действии космического излучения соответствуют расчетным величинам.

Блок защиты GDU смонтирован под потенциалом эмиттера. Он снабжен блоком питания мощностью 10 Вт, подключенным с разделением потенциалов. Для защиты IGBT от перегрузок GDU в непрерывном режиме контролирует величину напряжения эмиттер — коллектор. Связь прибора со схемой управления осуществляется через волоконно-оптические кабели. Блок управляет процессами включения и выключения транзистора, а также его защитным запирающим. GDU чрезвычайно важен для обеспечения надежной работы преобразователя. Разрабатывается программируемый блок GDU, параметры которого могут быть легко согласованы с IGBT разных типов.

Блок GDU имеет значительно меньшие размеры по сравнению с соответствующим блоком GO преобразователей на запираемых тиристорах.

## Примеры замены запираемых тиристоров транзисторами IGBT

### *Преобразователь электропоезда серии 423.2*

Поезда городской железной дороги серии 423 начиная со второй серийной партии стали оборудовать тяговыми преобразователями на транзисторах IGBT. По своей конструкции они взаимозаменяемы с преобразователями на запираемых тиристорах ГТО поездов первой серийной партии. Как и в схеме с ГТО, преобразователи на IGBT имеют четыре фазовых модуля в схеме регулятора 4QS и три модуля в схеме инвертора, размещаемые в водоохлаждаемых блоках SRBG. Блок инвертора WR-SRBG содержит также схему ограничения мгновенного значения напряжения MUB.

Используемые в преобразователях транзисторы IGBT смонтированы вместе с обратным диодом в

стандартном модуле размерами 190 × 140 мм с запирающим напряжением 3,3 кВ и рабочим током 1200 А (пиковые значения до 2400 А). Такой модуль смонтирован на водоохлаждаемой пластине. Он не требует ни демпферной цепи, ни параллельного соединения транзисторов.

В табл. 1 приведено сравнение электрических и механических характеристик тяговых преобразователей электропоездов серий 423.1 (на запираемых тиристорах GTO) и 423.2 (на биполярных транзисторах IGBT). Из таблицы видно, что масса блока SRBG на транзисторах IGBT составляет 35 % массы такого же блока на GTO. При этом оба блока содержат одинаковое число конденсаторов промежуточного звена, поскольку переход от GTO к IGBT не требует увеличения емкости этого звена. Однако следует отметить, что благодаря технологическому прогрессу в области изготовления конденсаторов их объем и масса постоянно уменьшаются. Общая масса преобразователя на IGBT на 20 % меньше, чем преобразователя на GTO, несмотря на то что первый включает в себя конденсаторы промежуточного звена, а во втором их нет, поскольку они смонтированы отдельно.

Благодаря совместимости преобразователей в обоих используется система управления MICAS-S.

Анализируя данные, приведенные в табл. 1, можно сделать следующие выводы об экономических преимуществах техники IGBT:

- более короткое минимальное время переключения делает возможным более быстрое отключение;
- более высокая тактовая частота снижает содержание гармоник в кривой тока;
- более низкие потери способствуют меньшим затратам на охлаждение и повышению КПД.

В четырехквadrантных регуляторах 4QS в обоих случаях используется тактовая частота 184 Гц (11-кратная по отношению к основной гармонике 16,7 Гц) из соображений снижения мешающих воздействий на питающую сеть. В этом отношении переход на технику IGBT практически ничего не изменил, поэтому преобразователь на IGBT поезда серии 423 не превышает допустимого предела мешающих токов, как и преобразователь на GTO.

#### Преобразователь электровоза серии 185.2

Контракт DBAG на поставку 400 электровозов серии 185 предусматривал переход от GTO к IGBT в ходе реализации заказа. В 2004 г. завершена поставка партии электровозов 185.1 с преобразователями на запираемых тиристорах. Наряду с этим компания Bombardier Transportation выпустила еще 115 электровозов платформы TRAXX F140 AC1 для других железнодорожных компаний.

В 2003 г. был построен первый предсерийный электровоз серии 185.2 с тяговыми преобразователями на транзисторах IGBT. В 2005 г. начался их серийный выпуск, который должен завершиться в 2008 г.

Водоохлаждаемый преобразователь на транзисторах IGBT относится к семейству MITRAC TC 3200. Он базируется на биполярном транзисторе с изолированным затвором IGBT, который смонтирован в единый модуль вместе с обратным диодом и устройством защиты GDU. Этот интегральный модуль, получивший название IPM, весит 4 кг, подключается к схеме с помощью штепсельного соединения, что значительно облегчает его замену. При необходимости такие модули могут быть соединены параллельно. В этом случае GDU одного из модулей выполняет функции главного и управляет остальными, содержащимися в подключенных параллельно модулях.

Концепция преобразователя предусматривает применение низкоиндуктивной ошиновки для соединения конденсаторов промежуточного звена. В схеме

Таблица 1

Сравнение модификаций тяговых преобразователей электропоезда серии 423

Характеристика	423.1 (GTO)	423.2 (IGBT)
<i>Электрические характеристики</i>		
Мощность на ободе колеса в расчете на один SRBG, МВт	1,2	
Напряжение промежуточного звена, В	1800	
Входное напряжение, В	2 × 900	
Максимальный входной ток, А	2 × 900	
Максимальный выходной ток, А	750	700
Минимальное время включения, мкс	80	16
То же, выключения, мкс	180	10
Тактовая частота инвертора, Гц	250	500
Возможная тактовая частота 4QS, Гц	217	284
Реальная тактовая частота 4QS, Гц	184	
Потери при номинальной нагрузке, кВт	28	16
<i>Механические характеристики блока SRBG</i>		
Длина, м	1,29	0,9
Высота, м	0,55	0,41
Ширина, м	0,54	0,48
Объем, дм <sup>3</sup>	383	177
Масса SRBG-4QS, кг	330	114
<i>Общие характеристики преобразователя</i>		
Масса, кг	1120	880
Размещение конденсаторов промежуточного звена (9,4 мкФ на один SRBG)	Снаружи	Внутри

Таблица 2

Сравнение характеристик тяговых преобразователей электровозов серий 185.1 и 185.2

Характеристика	185.1 (GTO)	185.2 (IGBT)
<i>Электрические характеристики</i>		
Мощность на ободе колеса в расчете на один SRBG, МВт	2,8	
Напряжение промежуточного звена, В	2800	
Входное напряжение, В	2 × 1340	
Максимальный входной ток, А	2 × 1280	2 × 1220
Максимальный выходной ток, А	1050	—
Номинальный выходной ток, А	—	872
Минимальное время включения, мкс	80	15
Минимальное время выключения, мкс	180	15
Тактовая частота инвертора, Гц	300	
Тактовая частота 4QS (при 16,7 Гц в сети)	184 (250)	300
То же (при 50 Гц в сети)	250	400
Максимальная мощность потерь, кВт	90	80
Потребление мощности локомотивом на стоянке, кВт	130	66
<i>Механические характеристики</i>		
Длина, м	3,4	
Высота, м	2,17	
Ширина, м	1,03	1,05
Объем, м <sup>3</sup>	7,6	7,75
Масса, кг	2950	2230
Охлаждающая жидкость	Полиэфир	Вода

преобразователя нет демпферных цепей. В контуре охлаждения циркулирует вода, смешанная с гликолем, который обеспечивает защиту от замерзания.

В период после 1998 г. тяговый преобразователь MITRAC TC 3200 впервые (с 2001 г.) был использован при модернизации и строительстве новых концевых моторных вагонов поезда Eurotunnel (всего 44 ед.). В 2004 г. их начали устанавливать на высокоскоростных поездах AVE серии S102 железных дорог Испании (RENFE), рассчитанных на максимальную скорость 350 км/ч (всего 32 ед.).

Преобразователь на транзисторах IGBT электровоза серии 185.2, как и вариант на GTO, питает два тяговых двигателя тележки. Трансформатор и двигатели остались без изменения. Принцип компоновки преобразователя также в основном сохранен.

Каждая ветвь фазового блока, содержащая транзистор IGBT, выполнена с двумя параллельно включенными модулями IPM. В результате фазовый блок содержит четыре IPM. Масса всего блока составляет 25 кг, что обеспечивает возможность легкой замены. В преобразователе на транзисторах IGBT восемь фа-

зовых блоков занимают центральную часть шкафа, слева размещены контакторы и выключатели, сверху конденсаторы промежуточного звена и поглощающей цепи, справа — электроника системы управления. В нижней части отсека с фазовыми блоками смонтированы устройства подключения.

Этот преобразователь спроектирован в расчете на тот же строительный объем, что и вариант на тиристорах GTO. Это отражено в табл. 2, где сравниваются характеристики обоих преобразователей электровоза серии 185. В задней части шкафа преобразователя на транзисторах IGBT остается много свободного пространства. Экономия массы преобразователя по сравнению с вариантом на запираемых тиристорах составила 24 %. При этом следует отметить, что переход на транзисторы IGBT не оказал влияния на другие компоненты, имеющие большую массу, а именно на блоки конденсаторов, выключатели и переклюатели.

В то время как тактовая частота инвертора не превышает 300 Гц, для регулятора 4QS она может быть значительно выше. Это значит, что емкость сетевого фильтра, размещенного в высоковольтной камере, может быть уменьшена в два раза. Исходя из экономии на конденсаторную батарею, можно отметить то преимущество, что минимальный импеданс локомотива с отключенным тяговым преобразователем повышается и сдвигается в сторону более высоких частот. Благодаря этому пассивный мешающий ток и ток фильтра при искаженной кривой питающего напряжения будут меньше.

Значения величины потерь на локомотивах обоих видов приблизительно одинаковы. Это связано с тем, что для их оценки существуют разные граничные условия. Значительно более низкие потери преобразователя на транзисторах IGBT наиболее объективно проявляются в режиме включения преобразователя во время остановки. Приведенные в табл. 2 величины 130 и 66 кВт получены именно в этом режиме.

Мощность преобразователей HBU, питающих вспомогательные приводы, у обоих электровозов также приблизительно одинакова из-за малой мощности насосов, используемых в системе водяного охлаждения. Кроме меньших потерь в преобразователе на транзисторах IGBT, следует также учитывать снижение потерь на вихревые токи в тяговом трансформаторе при более высокой тактовой частоте.

#### Многосистемный преобразователь

Многосистемный преобразователь для работы на линиях переменного тока и постоянного тока напряжением 3,3 кВ без последовательного соединения модулей или без использования трехточечной схемы впервые реализован с появлением модулей IGBT с на-

пряжением запитания 6,5 кВ. В этих преобразователях стали использовать в качестве стандартных модули HVIM типа 600A с размерами корпуса 140 × 190 мм, но большей высоты, чем у модулей на напряжение 3,3 кВ, и с увеличенным путем перекрытия.

Компания Bombardier Transportation разработала на базе этих компонентов новый модульный преобразователь MITRAC TC 3300. В его схеме могут быть параллельно включены до трех модулей с одним прибором защиты GDU.

Впервые преобразователь MITRAC TC 3300 был использован на 18 многосистемных электровозах серии Re 484 SBB. Эти локомотивы относятся к семейству TRAXX F140 MS и рассчитаны на системы тягового тока 15 кВ, 16,7 Гц и 3 кВ постоянного тока. Их поставки начались в 2004 г. В конце того же года электровоз получил допуск на линии Швейцарии и Италии.

Схема Re 484 для эксплуатации на переменном токе соответствует схеме локомотива DBAG серии 185.2, но с индивидуальным регулированием осей. У обоих локомотивов одни и те же тяговые двигатели, одинаковое напряжение промежуточного звена, равное 2800 В, одинаковые параметры сетевого фильтра. При эксплуатации под контактной сетью постоянного тока напряжением 3 кВ промежуточное звено секционируется (рис. 10). Два фазных блока 4QS в качестве понижающих регуляторов питают инвертор напряжением промежуточного звена (до 2,8 кВ).

Величина напряжения может регулироваться. Если напряжение в контактной сети 1,5 кВ, фазы 4QS

переключаются, образуя схему повышающего регулятора. Соответствующие регулирующие дроссели размещены в баке главного трансформатора. В качестве дросселя входного фильтра здесь, как и в электровозах E 412 (FS) и 189 (DBAG), используются тяговые обмотки трансформатора.

Питание инвертора через регулятор имеет следующие преимущества по сравнению с непосредственным питанием:

- меньшая нагрузка на полупроводниковые вентили, инвертор используется без параллельного включения модулей HVIM;
- отсутствует конфликт между опрокидывающим моментом при низком напряжении контактной сети и скачками тока двигателя при высоком. Под контактной сетью постоянного тока напряжением 1,5 кВ для питания инверторов используется полное напряжение промежуточного звена 2,8 кВ;
- возможность использования проверенных в эксплуатации тяговых двигателей электровоза серии 185;
- более высокий КПД во всем диапазоне мощностей;
- преимущества в меньшем воздействии тяги на питающую сеть, больше возможностей их ограничения.

Одна фаза, подключенная к промежуточному звену, питает через трансформатор вспомогательный преобразователь HBU напряжением с прямоугольной кривой и частотой 195 Гц.

Шкаф, в котором смонтирован преобразователь многосистемного электровоза, имеет длину 2,8 м, в

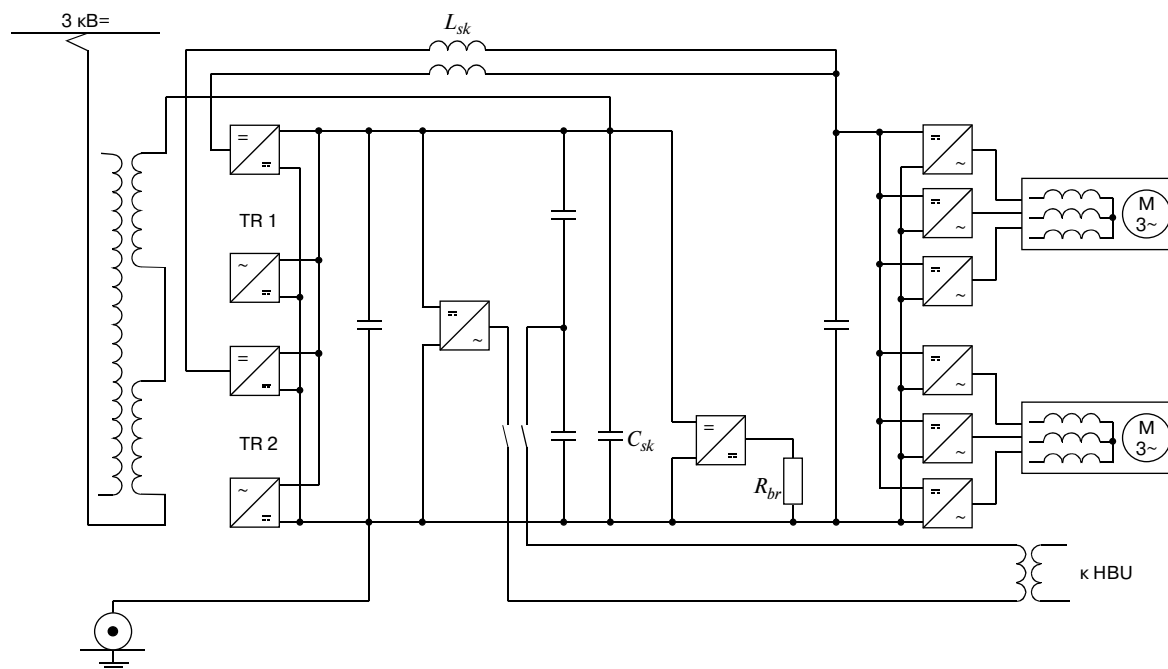


Рис. 10. Схема преобразователя на транзисторах IGBT типа MITRAC TC 3300 многосистемного электровоза серии Re 484, включенного для работы на постоянном токе напряжением 3 кВ:

$L_{sk}$  — дроссель поглощающей цепи;  $C_{sk}$  — конденсатор поглощающей цепи;  $R_{br}$  — тормозной резистор

то время как на электровозе серии 185 его длина 3,4 м. В левой части шкафа размещены разъемы и коммутационная аппаратура. Справа находятся четыре компактных тяговых блока SRBG: регуляторы 4QS1 и 4QS2, вспомогательный преобразователь HBU и тормозной регулятор, инверторы WR1 и WR2. В одном SRBG смонтировано на водоохлаждаемой панели до 12 силовых модулей HVIM.

Для обеспечения минимальной паразитной индуктивности часть конденсаторов промежуточного звена размещена в блоках SRBG. Остальные, а также батарея конденсаторов поглощающей цепи размещены в задней части шкафа. В случае необходимости к ним возможен доступ и спереди. Все SRBG имеют расположенные сзади в нижней части соединительные устройства, которые при вдвигании блока автоматически подключают водяную магистраль охлаждения.

Дальнейшее применение преобразователь MITRAC TC 3300 нашел на 44 концевых моторных вагонах поездов HST 250 железных дорог Испании, развивающих скорость до 250 км/ч и могущих эксплуатироваться на переменном токе напряжением 25 кВ, 50 Гц и постоянном напряжением 3 кВ.

## Выводы и перспективы

Как видно из приведенных данных, тяговый преобразователь на транзисторах IGBT может заменить преобразователь на запираемых тиристорах в любом из случаев применения. Благодаря низким потерям, особенно в режиме низких нагрузок, он значительно экономит затраты энергии на тягу. Повышенная тактовая частота позволяет использовать более компактное тяговое оборудование. Применяемая в схеме преобразователя концепция защиты является более щадящей по отношению к тяговым двигателям и другим компонентам привода.

После появления запираемых тиристоров прошло 20 лет. В связи с этим возникает вопрос о том, насколько продолжительной будет эпоха транзисторов IGBT и что придет им на смену. Большие ожидания связаны с вентилями на основе карбида кремния. Их повышенная устойчивость против термических нагрузок позволит значительно упростить схему охлаждения.

*W. Runge. Eisenbahntechnische Rundschau, 2005, № 7/8, S. 443 – 453.*

# Передвижные преобразовательные подстанции железных дорог Германии

*В 1960-е годы бывшие Государственные железные дороги ФРГ (DB) построили две передвижные преобразовательные подстанции, позволявшие в случае необходимости обеспечивать питание контактной сети однофазного переменного тока напряжением 15 кВ, 16,7 Гц от трехфазной электрической сети общественного пользования напряжением 110 кВ, 50 Гц. Их оборудование было таким же, как и стационарных подстанций с машинными преобразователями. Обе подстанции находились в эксплуатации в различных пунктах сети в течение 35 лет.*

После 1950 г. Государственные железные дороги ФРГ (DB) возобновили электрификацию железнодорожных линий по системе однофазного переменного тока напряжением 15 кВ, частотой 16,7 Гц. При этом питание тяговых подстанций осуществлялось от собственной однофазной сети первичного тягово-

го электроснабжения напряжением 110 кВ, частотой 16,7 Гц.

С 1954 до конца 1961 г. было вновь переведено на электрическую тягу 2500 км пути. При этом потребовались также новые тяговые и преобразовательные подстанции.

В этот период появились не только новые тепловые электростанции, но и преобразовательные подстанции. В соответствии с техническим уровнем того времени на них применялись машинные преобразователи, которые потребляли мощность из трехфазной сети общественного пользования частотой 50 Гц и преобразовывали ее в мощность однофазного переменного тока частотой 16,7 Гц, напряжением 110 кВ. Поскольку мощность таких преобразователей легко регулировалась, они были особенно удобны для компенсации пиков нагрузки. Для обеспечения надежности электроснабжения на железных дорог Германии применялись также передвижные тяговые подстанции.