

# Поезда третьего поколения серии С метрополитена Мюнхена

*Современный дизайн, высокий уровень комфорта, возможность изменения составности и использование последних достижений техники характеризуют поезда третьего поколения серии С, разработанные для метрополитена Мюнхена. В эксплуатации уже находятся 10 составов, являющихся совместной разработкой компаний Siemens и Bombardier. Вторая партия состоит из восьми поездов.*

## Проблемы оптимизации на мюнхенском метрополитене

Сеть линий метрополитена является основой системы общественного транспорта в Мюнхене. В 2004 г. поездами метро перевезено около 305 млн. пассажиров.

В настоящее время перевозки выполняет парк подвижного состава, состоящий из 248 двухвагонных секций DTW и новых поездов серии С. Из двухва-

гонных секций можно формировать 4- и 6-вагонные поезда. Парк DTW, который состоял из 194 секций серии А, построенных в 1971 г., с 1981 г. пополнялся секциями следующего поколения серии В, число которых достигло 63.

С ноября 2002 г. на сеть метрополитена Мюнхена поступают первые 6-вагонные поезда третьего поколения серии С (рис. 1).

Двухвагонные DTW можно было использовать в эксплуатации как короткие поезда, однако большей частью их соединяли в составы по две или три секции. Концепция эксплуатации подвижного состава, принятая в 1960-е годы и основанная на использовании двухвагонной DTW в качестве основной единицы, на практике полностью себя не оправдала. Сейчас на большинстве линий в основном курсируют 6-вагонные поезда, представляющие собой сцепы из трех DTW. Лишь в короткие периоды суток с уменьшенным пассажиропотоком обращаются поезда из одной или двух секций (рис. 2).



Рис. 1. Поезд третьего поколения серии С



Рис. 2. Поезда серий А, В и С, образующие парк подвижного состава метрополитена Мюнхена

С современной точки зрения считается невыгодным, что поезда, составленные из двухвагонных секций, содержат несколько неиспользуемых кабин машиниста. Они увеличивают массу и длину поезда, а также требуют регулярного проведения работ по техническому обслуживанию. Кроме того, кабины занимают место, которое могло быть использовано для размещения пассажирских сидений, препятствуют передвижению пассажиров вдоль поезда во время движения. В результате этого в поезде, составленном из трех секций, средняя, как правило, загружена меньше, чем крайние. На станциях концевые вагоны располагаются напротив входов на платформу, поэтому заполняются в первую очередь.

В последнее время к факторам, определяющим уровень комфортности поездки, пассажиры стали все чаще причислять субъективное ощущение безопасности. В результате они более охотно занимают места в вагонах, откуда виден машинист поезда.

В связи со сложной финансовой ситуацией многие коммуны, в том числе и муниципалитет Мюнхена, требуют от транспортной компании города дальнейшей экономической оптимизации метрополитена. Новое поколение поездов обеспечит снижение эксплуатационных затрат, повышение эксплуатационной готовности и оптимизацию энергопотребления.

### Реализация проекта

Поезда третьего поколения, предназначенные для удлиняемых и модернизируемых линий, а также для замены списываемых поездов, были положены в основу проекта оптимизации метрополитена. Дизайн поездов серии С еще до презентации, проходившей в конце мая 2001 г. на одной из станций метрополитена, получил специальный международный приз. Этот успех обеспечен компанией Neumeister+Partner Industrial Design, которая в свое время выполнила дизайнерские разработки для поездов ICE3, ICE-T и Transrapid.

Контракт на поставку новых поездов был подписан с консорциумом во главе с компанией Siemens Transportation Systems. В то время в консорциум входили также компании Adtranz и завод в Баутцене, принадлежавший компании Deutschen Waggonbau (DWA). В период проведения разработок оба этих предприятия вошли в состав транспортного отделения канадской компании Bombardier со штаб-квартирой в Хеннигсдорфе. Таким образом, консорциум образовали две компании — Siemens Transportation Systems и Bombardier Transportation.

Эти преобразования выразились в изменении названия компании-партнера и решающим образом повлияли на ход разработок. Так, пришлось дважды

менять предприятие, которое должно было изготавливать компоненты механической части поезда. Сначала это был завод в Нюрнберге, затем завод в пригороде Берлина Панкове и, наконец, комбинат в Хеннигсдорфе. Для организации разработок в таких сложных условиях потребовались интенсивные контакты между участниками консорциума, от эффективности которых зависело качество реализации всего проекта. Тесное сотрудничество изготовителей с транспортной компанией Мюнхена, а также более чем с 20 поставщиками комплектующих привело к успешному завершению разработок, качество которых отвечало всем требованиям, оговоренным контрактом.

Уже через месяц после начала эксплуатации новых поездов серийной партии транспортное предприятие Мюнхена дополнительно заказало консорциуму еще восемь поездов. Первая партия из десяти поездов получила серийное обозначение С1.9, а дополнительная — С1.10.

### Концепция поезда

#### Улучшенный обзор

Поезд серии С длиной 115 м состоит из шести вагонов, два из которых — концевые с кабинами управления и четыре — промежуточные. Отработка внутренней планировки (рис. 3) велась на макете вагона, изготовленном в натуральную величину компанией Stonner (Аугсбург). Задняя стенка кабины машиниста выполнена прозрачной, поэтому пассажиры могут видеть машиниста из любой точки вагона.

Концевые вагоны имеют одинаковую конструкцию и идентичное оборудование, поэтому отвечают требованиям взаимозаменяемости. В поезде может быть от одного до четырех промежуточных вагонов, также взаимозаменяемых, хотя основная конфигурация — шестивагонная, что соответствует поезду максимальной длины, составленному из трех двухвагонных секций DTW.

#### Возможность гибкого изменения составности

В отличие от многих других поездов метрополитена поезд серии С формируется из вагонов только двух типов — концевых и промежуточных. Во всех вагонах все оси моторные. Поезд, в который входит от трех до шести вагонов, может быть сформирован без значительных затрат с использованием

технических средств, которыми располагает депо Nord на станции Фрёттманинг.

На практике изменение составности поездов требуется лишь для линий с небольшим пассажиропотоком. Кроме того, отдельные промежуточные вагоны могут изыматься из эксплуатации для проведения ремонтных работ. В этом случае поезд может эксплуатироваться с уменьшенным числом вагонов, если это позволяют параметры пассажиропотока.

### Требования к электрической части и новые решения

Значительная гибкость в изменении составности, необычная для поездов на коротких сцепках, обеспечивает высокую эксплуатационную готовность и экономическую эффективность поездов серии С. Вместе с тем для этого потребовались новые технические решения в отношении систем управления движением и регулирования, тягового электроснабжения, размещения компонентов тягового привода и вспомогательных устройств, а также обеспечения обмена данными в поезде.

#### Концентрация оборудования в концевых вагонах

Для размещения оборудования с учетом принятого дизайнерского решения потребовалась концентрация электронных компонентов в концевых вагонах. Каждый из двух концевых вагонов обеспечивает электроснабжение половины состава, т. е. одного или двух промежуточных вагонов (в зависимости от составности).

Пульт в кабине машиниста, являющийся пунктом концентрации устройств, обеспечивающих безопасность движения, служит также для управления



Рис. 3. Интерьер поезда серии С

размещенными по всем вагонам устройствами отопления и вентиляции, блоками тягового и тормозного оборудования.

В концевых вагонах также размещены распределительное устройство главного тока и тяговый преобразователь, шкаф с аппаратурой управления, преобразователь питания вспомогательных устройств, батарея аккумуляторов, компрессор, система обработки и подготовки сжатого воздуха, а также кондиционер кабины машиниста.

Для того чтобы это обилие оборудования не мешало пассажирам, максимально использовано подкузовное пространство вагона. Кроме того, было минимизировано число отдельных компонентов и уменьшены их габариты. В то же время концентрация компактных компонентов оборудования привела к увеличению удельного энергопотребления на единицу занимаемого оборудованием объема. Это потребовало разработки новых надежных противопожарных систем, которые контролируют не только температуру в зоне размещения оборудования, но и ее градиент. Благодаря этому обеспечивается своевременная автоматическая реакция системы на критические изменения температурного режима, которая является более надежной по сравнению с противопожарными устройствами, зависящими от человеческого фактора. Перед включением пожарной сигнализации система посылает машинисту сообщение об опасной ситуации, которое отображается на дисплее в виде обычного текста.

#### *Применение силовых транзисторов IGBT*

Компактность блоков силовой электроники и их высокий КПД в большой степени обеспечены использованием схем на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT). Эти транзисторы характеризуются низкими потерями и дают возможность точного регулирования систем. Низкие потери обеспечивают не только экономию энергии, но и низкий уровень отдачи тепла, что дает возможность создания на их базе компактных модулей.

В связи с этим транзисторы IGBT разной мощности использованы во всех преобразователях, имеющих в поезде серии С: тяговых, вспомогательных (НВУ), питающих бортовую сеть постоянного тока, а также в системах регулирования частоты вращения вспомогательных электрических машин, в том числе двигателей вентиляторов в пассажирских салонах.

#### *Пылезащищенное исполнение подвагонного оборудования*

Размещение оборудования под кузовом требует, чтобы все контакторы, трансформаторы, преобразователи и распределительные панели располагались в защищенных от пыли корпусах. Это можно видеть

на примере транзисторов IGBT тягового преобразователя, которые, будучи скомпонованными в фазовые модули с беспотенциальными охладителями, размещены в контейнере, имеющем пылезащищенное исполнение.

К компонентам с принудительным воздушным охлаждением (дросселям сетевых фильтров, фазовым модулям тягового преобразователя) воздух подводится через систему очищающих фильтров. Эти фильтры задерживают пылевидные продукты износа колес и рельсов в тоннелях, а на открытых участках — снег. Не требующий обслуживания фильтр тонкой очистки работает на принципе центробежного осаждения частиц. Действие обоих фильтров препятствует отложению загрязнений на охлаждаемых полупроводниковых приборах, что является залогом высокой надежности их работы.

#### *Пассивная конвекция и охлаждение встречным потоком воздуха*

Компактность и экономичность электронных модулей в значительной мере обусловлены тем, что для ряда компонентов использовано пассивное конвекционное охлаждение вместо принудительного. Важными компонентами, для которых применено охлаждение встречным потоком воздуха, являются оптимизированные по термодинамическим критериям тормозные резисторы.

Конвекционное охлаждение снижает затраты энергии, что позволяет оснащать поезд вспомогательным преобразователем меньшей мощности. Это, в свою очередь, дает возможность выполнить его более легким и компактным. Сокращение числа вентиляторов снижает эксплуатационные затраты и уменьшает вероятность отказов охлаждаемого силового оборудования, что повышает эксплуатационную готовность парка поездов серии С.

#### *Повышение эксплуатационной готовности за счет резервирования компонентов*

Все наиболее важные электротехнические и электронные устройства поезда выполнены резервированными с целью оптимизации эксплуатационной готовности.

В системе управления параллельно работают два центральных блока ZSG, расположенные в концевых вагонах. При выходе из строя активного блока все его функции автоматически переходят к активизирующемуся резервному ZSG без каких-либо задержек и изменений рабочих режимов оборудования. Поезд остается полностью работоспособным, но отсутствие резервного блока управления требует проведения осмотра или замены неисправного ZSG в период, когда пассажиропоток становится минимальным.

Такой же принцип реализован и для вспомогательных устройств и агрегатов. Так, во время движения поезда достаточно, чтобы работал один компрессор. Другой при этом остается в резерве. В эксплуатации они включаются попеременно, в зависимости от направления движения. При отказе активного компрессора автоматически включается резервный. В нормальном режиме при подготовке поезда к работе включаются оба компрессора для быстрой зарядки воздушных резервуаров.

Преобразователи, питающие вспомогательные устройства, резервированы таким же образом. При выходе из строя одного из модулей активного НВУ происходит автоматическое включение такого же модуля резервного преобразователя.

Высокая эксплуатационная готовность поезда серии С обеспечивается также 100 %-ной моторизацией осей и непрерывным обменом данными между всеми компонентами поезда. При выходе из строя тягового оборудования одного вагона должен включиться механический дисковый тормоз. Перед его срабатыванием на режим электрического торможения переключаются все оставшиеся в исправном состоянии тяговые двигатели поезда.

## Электрическая часть

### Элементы цепи главного тока

**Контактный рельс и токоприемники.** Тяговое электроснабжение на метрополитене Мюнхена осуществляется с помощью контактного рельса. Он располагается на высоте 190 мм над УГР и обеспечивает поезд постоянным током напряжением 750 В. Токоприемники смонтированы на определенных тележках концевых и промежуточных вагонов. При этом обеспечен соответствующий уровень электрической изоляции токоприемников по отношению к рамам тележек. Кроме того, тележки имеют дополнительную облицовку изолирующим материалом, что предотвращает переброс на корпус электрической дуги, возникающей при отрыве токоприемников, например во время прохождения стрелочных переводов.

Продольное расположение токоприемников соответствует геометрии токосъема поездов серий А и В. Токоприемник прижимается к контактному рельсу с моментом 160 Н·м, обеспечиваемым регулируемой пружиной. Поднятие и опускание токоприемников производится подачей пневматического импульса. В рабочем состоянии токоприемник механически блокируется.

При отсутствии давления в воздушной магистрали токоприемник можно поднять вручную с помощью специального изолирующего приспособле-

ния, имеющегося в комплекте инструмента машиниста.

Токоприемник типа 1Fb197.01 компании Stemman Technik, которым оборудованы поезда серии С, имеет токосъемные пластины с большим сроком службы. Это обеспечивается применением специальной легированной стали с особо низким износом. Рядом с токоприемниками концевых вагонов расположены дистанционно управляемые короткозамыкатели с пневматическим приводом, позволяющие в случае необходимости заземлять контактный рельс через токоприемник и контакт колеса — рельс.

**Соединительный кабель.** Через токоприемники и соединяющий их кабель получает питание половина состава, т. е. один концевой вагон и один или два (в зависимости от составности) промежуточных. Благодаря этому кабелю исключаются колебания напряжения по длине поезда, которые могут возникать в результате изменения нагрузки, например при трогании, рекуперативном торможении или движении через стрелочный перевод, когда происходит отрыв от контактного рельса одного из токоприемников.

Непосредственно от соединительного кабеля получают питание устройства электрического отопления кабины машиниста (FST) и пассажирских салонов (FCR).

**Разрядники и главные выключатели.** К шине на участке цепи главного тока между токоприемником и главным выключателем подсоединен разрядник типа 3EQ1-BD производства компании Siemens, который защищает оборудование от атмосферных и коммутационных перенапряжений.

Тяговый преобразователь защищают главные выключатели, прерывая подачу тока при возникновении тяжелых аварийных режимов, таких, как экстремальные перегрузки или короткие замыкания. Для этой цели использованы автоматические выключатели постоянного тока, оснащенные дугогасительной камерой компании ABB Sécheron (Женева).

В главной токовой цепи каждой половины поезда имеются два главных выключателя, смонтированных в контейнере с силовой аппаратурой под кузовом концевой вагона. При коротком замыкании выключатель способен разрывать ток 30 кА с постоянной времени 15 мс. По термической стойкости он рассчитан на номинальный ток 1000 А. В течение 20 с выключатель может выдерживать ток 2000 А.

### Контроль гармоник частотой 50 Гц

Все преобразователи, относящиеся к одной половине поезда, в том числе тяговый и вспомогательный НВУ, получают питание через распределительное устройство, расположенное в концевом вагоне. Здесь же находится блок контроля гармоник частотой 50 Гц (рис. 4), который определяет ее уровень и

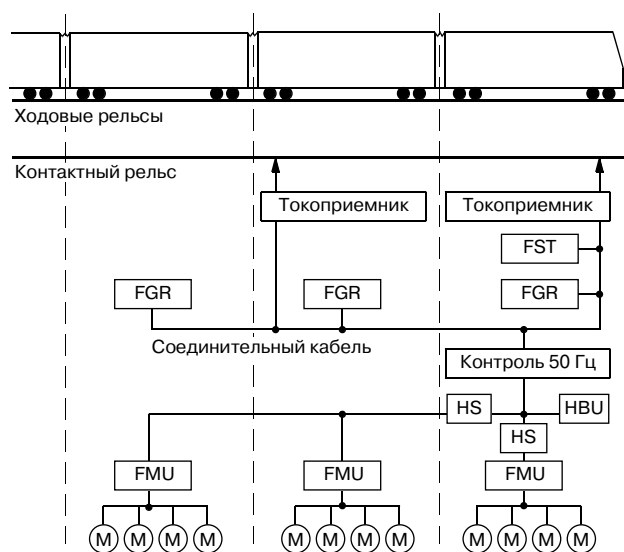


Рис. 4. Основные элементы цепи главного тока с соединительным кабелем:

FST — отопление кабин машиниста; FGR — отопление пассажирских салонов; HS — главный выключатель; FMU — тяговый преобразователь; М — тяговый двигатель

длительность действия. Кроме того, он оценивает уровень и частоту других гармоник, возникающих в процессе работы тягового и вспомогательного преобразователей. Система контроля разработана компанией Siemens.

Гармоническая составляющая частотой 50 Гц, попадая в цепь обратного тока, т. е. в ходовые рельсы, может вызвать серьезные сбои в работе рельсовых цепей, работающих на этой же частоте. Блок контроля отключает оборудование, генерирующее гармонику 50 Гц, если ее уровень достигает допустимого предельного значения.

В отличие от поездов, составленных из двухвагонных секций, новый поезд имеет меньше точек измерения и контроля частоты 50 Гц. В центральном распределительном устройстве, питающем половину состава, производится суммарная оценка всех высших гармоник, поступающих с поезда в тяговую сеть. При этом допустимый уровень гармоники

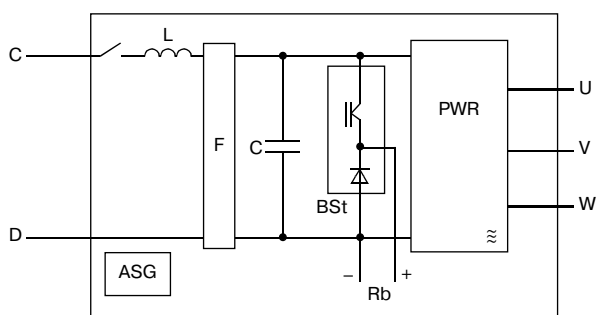


Рис. 5. Схема тягового преобразователя:

L — дроссель; F — сетевой фильтр; C — звено промежуточного напряжения; BSt — тормозной регулятор; Rb — подвод к тормозному резистору; PWR — импульсный инвертор напряжения; U, V, W — трехфазный выход инвертора; ASG — блок регулирования тяги

50 Гц, пропорциональный суммарному значению, принимается более высоким, чем для поездов из двухвагонных секций. Благодаря этому блок контроля срабатывает реже под действием переходных процессов, возникающих при прохождении мест разрыва контактного рельса. В результате уменьшается число ложных принудительных торможений, инициируемых блоком контроля гармоник.

#### Система тягового привода

В поезде серии С все оси оборудованы асинхронными трехфазными тяговыми двигателями регулируемой частоты, двухступенчатыми редукторами и бесконтактными датчиками частоты вращения. Блок регулирования тяги (ASG), звено регулирования мощности, сетевой фильтр и компоненты промежуточного звена постоянного напряжения для всех четырех осей одного вагона размещены в компактном тяговом контейнере типа G750 D530/485 M-1 с принудительным охлаждением, разработанном компанией Siemens.

**Тяговый преобразователь.** Контейнер расположен под кузовом в поперечном направлении. С левой стороны в нем имеется люк для доступа к блоку ASG и двум выдвижным фазовым IGBT-модулям тягового преобразователя. В средней части контейнера смонтированы фильтры грубой и тонкой очистки воздуха, а в правой расположена герметизированная зона подключения кабелей.

Напряжение питания тягового преобразователя (рис. 5) подается через главный выключатель. Кроме того, на входе преобразователя включены система контроля частоты 50 Гц, разрядник и заземлитель компании Frost Erdungskontakte.

Основными элементами цепи тягового тока являются импульсный инвертор PWR, промежуточное звено постоянного напряжения C, тормозной регулятор BSt, сетевой дроссель L и фильтр F. Инвертор и тормозной регулятор сконструированы из отдельных заменяемых фазовых модулей закрытого исполнения, построенных на транзисторах IGBT.

Импульсный инвертор преобразует постоянный ток в трехфазный регулируемой частоты, подаваемый на асинхронные тяговые двигатели.

Тормозной регулятор имеет вынесенный тормозной резистор. Инвертор и тормозной регулятор управляются блоком ASG.

Сетевой дроссель L представляет собой катушку индуктивности без стального сердечника. Его магнитная ось ориентирована поперек вагона. Вместе с батареей конденсаторов и схемой подавления мешающих токов он образует сетевой фильтр. Этот фильтр служит для того, чтобы высшие гармонические составляющие тягового тока, попадающие в контактную сеть, не превышали заданных предель-

ных значений. Особо жесткие требования предъявляются к уровню гармоник 50 Гц, так как на этой частоте работают рельсовые цепи метрополитена Мюнхена.

Промежуточное звено постоянного напряжения представляет собой батарею конденсаторов, которая обеспечивает необходимую для работы импульсного инвертора коммутационную реактивную мощность.

**Блок регулирования.** Блок ASG предназначен для регулирования сил тяги и торможения, которое осуществляется путем изменения частоты и амплитуды напряжения, подаваемого на обмотки тяговых двигателей. Датчики частоты вращения, встроенные в тяговые двигатели, подают в цепь регулирования соответствующую информацию, позволяющую сравнивать величины задаваемого и истинного значений частоты вращения. ASG выполнен на базе системы Sibas-32 и смонтирован в контейнере стандартного блока Sipac ES902, разработанного компанией Siemens.

Помимо задаваемых значений скорости, команд на включение режимов тяги или торможения, предельных значений различных параметров, контролируемых значений тягового и тормозного тока, а также сравниваемых задаваемых и истинных значений параметров, в блок регулирования поступают данные о величине давления в воздушных рессорах подвески кузова, характеризующие степень загрузки вагона. С учетом этого параметра задаваемые значения сил тяги и торможения корректируются таким образом, чтобы для всего поезда обеспечивалось оптимальное ускорение или замедление, не зависящее от загрузки отдельных вагонов. Вычислительные операции, выполняемые системой управления, базируются на так называемом трансекторном принципе регулирования. Его алгоритмы преобразуют сформированные задаваемые значения сил тяги и торможения в отдельные составляющие для главного тока тягового двигателя и тока намагничивания. Эти новые задаваемые значения поступают в блок управления импульсного инвертора, где с учетом их формируются импульсы управления для фазовых модулей.

Для обеспечения низкого уровня излучаемого поездом шума большое внимание было уделено разработке комбинаций импульсов для регулирования режимов тяги и торможения. Благодаря этому удалось исключить возможности возникновения резонансов в тяговой кинематической схеме и тормозном резисторе, что позволило максимально снизить уровень шума.

**Двигатель и редуктор.** В одноосной тележке (рис. 6) вращающий момент передается от поперечно расположенного тягового двигателя на ось колесной пары через редуктор и полый вал с системой поводков, разработанной компанией Vulkan Kupplungs- und Getriebebau & Co/KG (г. Херне) и изготовленной

#### Технические данные тягового преобразователя и его компонентов

Размеры, мм.....	1860×1684×520
Масса, кг.....	850
Класс защиты.....	I по VDI 0106, часть I
Диапазон эксплуатационных температур, °С.....	-25...+45
Входное напряжение, В.....	750 ± 33 % постоянного тока
Выходное напряжение, В.....	3×(0 – 560)
Выходной ток, А.....	3×590
Регулируемая частота на выходе, Гц.....	0 – 208
Максимальная тактовая частота инвертора, Гц.....	1000
<i>Тормозной регулятор</i>	
Эффективное значение тока, А.....	440
<i>Сетевой дроссель</i>	
Индуктивность, мГн.....	2,5
Номинальный ток, А.....	460
Максимальная частота, кГц.....	10
<i>Фазовый IGBT-модуль</i>	
Напряжение, В:	
номинальное.....	750
максимальное.....	1000
Ток, А:	
номинальный (эффективное значение).....	1300
максимальный отключаемый.....	4000
Типовая тактовая частота, Гц.....	1500
Размеры, мм.....	464×250×640
Масса, кг.....	55

на заводе KWD Kupplungswerk в Дрездене. Эта система способствует компенсации взаимных колебаний оси колесной пары и редуктора. Благодаря этому уменьшается необрессоренная масса (общая масса двигателя и редуктора составляет 885 кг), что улучшает плавность хода тележки и всего поезда, а также снижает степень износа колес.

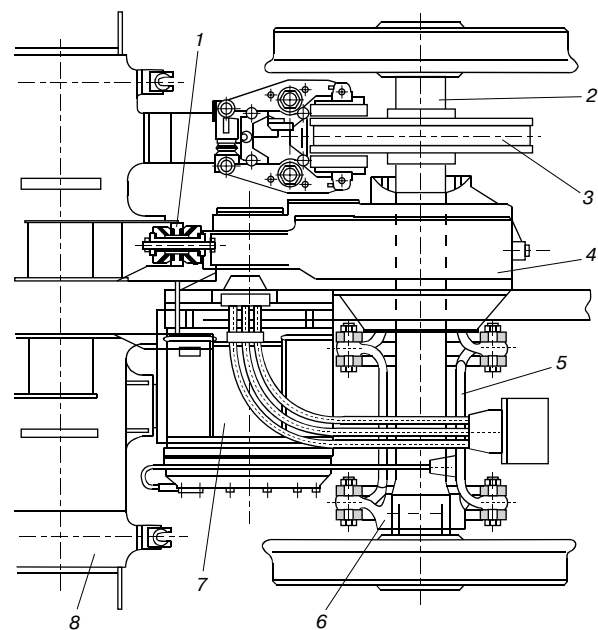


Рис. 6. Одноосная тележка и моторно-редукторный блок:

1 — точка подвешивания тягового привода в тележке; 2 — ось колесной пары; 3 — тормозной диск; 4 — редуктор; 5 — полый вал; 6 — муфта тяговой передачи; 7 — тяговый двигатель; 8 — рама тележки



Рис. 7. Моторно-редукторный блок

В поезде серии С применена комбинация тягового двигателя с редуктором — так называемый интегрированный привод типа 2KF1914 1GJ00 (рис. 7). Он представляет собой тяговый двигатель закрытого исполнения типа 2KF1914-0JA03 со встроенным бесконтактным датчиком частоты вращения и двухступенчатым цилиндрическим редуктором с погружным масляным охлаждением. На поездах первой поставки (С1.9) установлены редукторы типа HSH BA10-235 компании ZF Bahntechnik, Фридрихсхафен, а на поездах второй партии (С1.10) — редукторы компании Siemens.

Вал ротора двигателя с помощью центрированной муфты жестко соединен с валом шестерни ре-

дуктора, имеющим с обоих концов подшипники. Благодаря этому для двигателя не требуется подшипниковый щит со стороны редуктора. Двигатель и редуктор состыкованы с помощью фланцевого соединения и образуют блок закрытого исполнения, требующий минимальных затрат на техническое обслуживание.

Охлаждаемый с помощью самовентиляции тяговый двигатель имеет статор с воздушными каналами для внутреннего и наружного охлаждения, ориентированными в осевом направлении. Наружные каналы легко поддаются очистке, а внутренние надежно защищены от загрязнения благодаря герметизированному корпусу.

### Вспомогательный преобразователь HBU

Поезд серии С оснащен двумя преобразователями для питания вспомогательных машин и агрегатов (HBU), разработанными в Германии компанией Transtechnik (Хольцкирхен). Они питают:

- бортовую трехфазную сеть напряжением фиксированной частоты;
- двигатели с регулируемой частотой вращения, служащие для привода вентиляторов в пассажирских салонах;
- бортовую сеть постоянного тока напряжением 110 В, к которой автоматически подключаются аккумуляторные батареи при выпадении контактной сети;
- зарядные агрегаты аккумуляторных батарей.

Вспомогательная схема пуска при отсутствии напряжения контактной сети питает силовую электронику преобразователя HBU независимо от степени заряда аккумуляторных батарей до тех пор, пока не появится напряжение 750 В.

Регулирование модулей HBU осуществляется с помощью системы управления, с которой преобразователь соединяется через многофункциональную информационную шину MVB-M.

Бортовую сеть трехфазного тока напряжением  $3 \times 460$  В параллельно питают оба HBU. В этой системе напряжения используется частота 60 Гц во избежание конфликта с рельсовыми цепями, работающими на частоте 50 Гц. От этой сети получают питание:

- установки кондиционирования воздуха в кабинах машиниста;
- компрессор;
- вентиляторы в системе охлаждения тягового преобразователя.

При выходе из строя одного из преобразователей второй, расположенный в другом концевом вагоне, обеспечивает питание всех вспомогательных устройств. Система управления, получившая сообщение об отказе одного из HBU, дает команду на ав-

Технические данные моторно-редукторного блока	
<i>Тяговый двигатель</i>	
Охлаждение. ....	самовентиляция и наружный обдув (0,29 м <sup>3</sup> /с при 1000 об/мин)
Диаметр отверстия статора, мм. ....	300
Длина пакета стали, мм. ....	220
Номинальная мощность, кВт. ....	100
Номинальная частота, Гц. ....	91
Уровень напряжения по изоляции, В. ....	1500
Максимальное напряжение, В. ....	780
Максимальный ток, А. ....	271
Максимальная частота вращения, об/мин. ....	4100
Схема соединения обмоток. ....	звезда
<i>Редуктор</i>	
Максимальный момент при трогании ( $\mu = 0,5$ ), Н·м. ....	25 016
Передаточное число. ....	7,45
Максимальная частота вращения на входе, об/мин. ....	4100
Максимальный момент при коротком замыкании двигателя, Н·м. ....	6500
Масса (без масла, без элементов крепления), кг. ....	294
Объем масла, л. ....	5
<i>Колесные пары</i>	
Диаметр колес, мм:	
новых. ....	850
изношенных. ....	770
Допустимая разница диаметров колес в тележке, %. ....	0,8



томатическое включение контактора, который соединяет между собой обе секции шин трехфазного тока регулируемой частоты бортовой сети. При этом система определяет приоритетность потребителей, в соответствии с которой они подключаются к питающей сети.

Распределение нагрузки бортовой сети постоянного тока напряжением 110 В между двумя работающими НВU осуществляется в соответствии с командами, поступающими из шины MVB-M, с которой связаны оба преобразователя.

#### *Использование аккумуляторных батарей при отсутствии напряжения контактной сети*

При выпадении контактной сети или выходе из строя модуля НВU, питающего бортовую сеть постоянного тока, включается батарея никель-кадмиевых аккумуляторов типа SRX 44E1 производства французской компании SAFT (Бордо). Емкость батареи выбрана такой, чтобы она могла питать соответствующие потребители в течение 1, 5 или 24 ч в зависимости от режима, заданного системой управления. При этом центральный блок управления автоматически отключает прочих потребителей, питание которых заблокировано системой управления.

Оптимальная эксплуатация аккумуляторных батарей с полным использованием их срока службы в значительной степени обеспечивается выбранным режимом из заряда, который реализуется преобразователем НВU на базе контроля температуры.

#### *Система торможения*

На первом этапе торможения используется электрический рекуперативный тормоз. При этом рекуперированная энергия возвращается в сеть, если последняя в состоянии ее принять. При отсутствии такой возможности включается тормозной резистор поезда, на котором электрическая энергия преобразуется в тепло.

**Координация работы электрического и пневматического тормозов.** При скорости ниже 1 км/ч система регулирования включает пневматический дисковый тормоз, имеющий собственную систему управления и действующий до полной остановки поезда. Во время стоянки накладки прижимаются к тормозным дискам половины всех колесных пар с помощью энергии, накопленной в пружинном аккумуляторе.

При открытых дверях вагонов система управления торможением несколько уменьшает силу прижатия накладок к тормозным дискам. Это необходимо для того, чтобы при трогании сократить длительность процесса отпуска стояночного тормоза. В конечном итоге это позволяет уменьшить время оборота поезда. После включения тяговых двигателей си-

стема управления торможением отпускает стояночный тормоз, исключая при этом возможность откатывания состава назад на станциях, расположенных не на площадке.

При выходе из строя одного из тяговых агрегатов тормозная мощность остальных частично повышается. В случае отказа нескольких тяговых агрегатов, когда термическая нагрузка на оставшиеся в работе превышает в режиме торможения допустимый предел, система регулирования включает дисковый тормоз. В этой ситуации система регулирования, учитывая термическую нагрузку оставшихся в работе тяговых агрегатов, распределяет между ними мощность электрического торможения.

**Тормозной резистор.** Экономичность поезда серии С в значительной мере определяется концепцией тормозного резистора с конвекционным охлаждением. Благодаря этому отпала потребность в вентиляторах охлаждения, обычно потребляющих значительную мощность, в результате чего вспомогательный преобразователь НВU оказался настолько компактным, что его удалось разместить в раме концевого вагона. Это позволило четко разделить задачи конечных и промежуточных вагонов, что является важным с точки зрения гибкого формирования составов.

Секции резистора производства компании Post Glover International выполнены из хромоникелевой стали. При гашении максимального количества тормозной энергии они могут нагреваться до 700 °С. При этом сохраняются все характеристики материала Micaglas, изолирующего резистор от корпуса. К резистору, смонтированному под кузовом вагона, поток охлаждающего воздуха поступает снизу, а нагретый отводится вбок.

При разработке и оптимизации компоновочной схемы и конструкции кожуха резистора были проведены глубокие исследования с использованием методов термодинамического моделирования и проведением экспериментов с направляемыми потоками тепловой энергии.

Поскольку тормозной резистор включается только в случае невозможности возврата рекуперированной энергии в сеть, режим его работы постоянно контролируется прибором ASG. Степень его загрузки

#### Технические данные тормозного резистора

Сопротивление, Ом (+7/–5 %):	
при 20 °С.....	0,65
при 700 °С.....	0,74
Номинальная мощность, кВт... 422 (в сумме 15 с в течение 55 с)	
Масса сплава сопротивления, кг.....	60
Номинальное напряжение, В.....	950 (постоянный ток)
Максимальный ток, А.....	2220
Максимальная мощность, кВт.....	1022
Размеры, мм.....	800×1300×690
Масса, кг.....	210

ки определяется по температуре нагрева секций. Если она достигает установленного предельного значения, срабатывает защитный термостат, подающий команду на отключение резистора. Однако система ASG настроена таким образом, чтобы определять критическую температуру, предшествующую предельной. При ее достижении система выполняет операции, направленные на снижение нагрузки на резистор путем дополнительного включения пневматического тормоза или перехода на более легкий скоростной режим.

Для того чтобы вентиляторы пассажирских салонов не подавали в вагон горячий воздух, отводимый от тормозного резистора, воздуховоды надежно изолированы друг от друга.

### **Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха**

Системы отопления с преимущественным использованием тепла тормозных резисторов, разрабатываемые компанией Siemens, применяются в поездах многих компаний. В поездах серии С метрополитена Мюнхена применена система отопления вагонов с более точным регулированием температурного режима, осуществляемым центральной системой управления поездом.

#### *Агрегат отопления и вентиляции*

Агрегат для систем отопления и вентиляции пассажирского салона размещен в раме каждого вагона. В режиме отопления отфильтрованный свежий воздух забирается снизу, подогревается и с помощью системы воздушных каналов распределяется по пассажирскому салону. Отработавший воздух уходит через вентиляционные решетки в потолок.

В режиме вентиляции направление потока обратное. Забор свежего воздуха производится сверху. Переход из одного режима в другой происходит на базе сравнения температур воздуха снаружи и внутри вагона. Во избежание резких изменений режимов предусмотрен определенный гистерезис переключения.

Агрегат отопления и вентиляции состоит из осевого вентилятора производства компании Siemens, нагревательного регистра фирмы Triatherm (Зоннеберг), теплообменника, вытяжного вентилятора, гасителя воздушного шума с фильтром FSA компании Karolnek (Штутгарт), не требующим обслуживания. Кроме того, к системе отопления и вентиляции относится большое число датчиков температуры. Диапазон рабочих напряжений системы отопления — 500 – 970 В. Номинальная мощность нагревательного регистра, рассчитанная для напряже-

ния 850 В, составляет 56 кВт. Работа всех температурных датчиков и контакторов, включающих отопление, контролируется бортовой системой диагностики.

#### *Использование энергии торможения*

Система электрического отопления рассчитана на преимущественное использование энергии, высвобождающейся при электрическом торможении. Напряжение подается на регистр через контакторы, включающиеся с заданной тактовой частотой. При этом система отопления после каждой фазы торможения, длящейся 20 с, рассчитывает потребность в тепловой энергии до поступления следующего импульса напряжения от тяговых двигателей, работающих в режиме генераторов. Напряжение, подаваемое на регистр, постоянно измеряется. Результаты измерений используются для оценки энергопотребления.

При подаче напряжения регистр быстро нагревается до высокой температуры, в соответствии с чем воздух, предназначенный для подачи в салон, оказывается слишком горячим. Для выравнивания его температуры служит буферное устройство, смонтированное в тракте питающего воздуховода и состоящее из алюминиевых пластин, поглощающих тепло. Во время пауз торможения эти пластины постепенно отдают тепло, благодаря чему температура воздуха, подаваемого в салон, выравнивается. Система контролирует эту температуру с точностью  $\pm 1$  К.

При вынужденном длительном движении с пониженной скоростью или во время хода поезда по открытому участку большой длины количество накопленного в буфере тепла может оказаться недостаточным для отопления. В этом случае система использует напряжение, поступающее из бортовой системы электроснабжения, которое подается на регистр также в тактовом режиме. Расчеты и измерения показали, что доля отопительной энергии, потребляемой из бортовой сети, не превышает 40 % общих энергозатрат на отопление.

#### *Регулирование подачи воздуха*

Количество воздуха, необходимое для подачи в пассажирские салоны, определяется системой управления ZSG, которая руководствуется температурой воздуха снаружи, населенностью поезда, его рабочими параметрами и режимом работы установки (отопление или вентиляция). Регулирование осуществляется изменением частоты вращения вентилятора с трехфазным приводом, подающего воздух в систему. Номинальный режим подачи воздуха ориентирован на максимальную населенность вагона (115 чел.). При меньшем числе пассажиров или при наружной температуре ниже  $-10$  °С количество по-

даваемого воздуха уменьшается. Если температура снаружи  $+20...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , количество подаваемого воздуха линейно увеличивается от  $3100\text{ м}^3/\text{ч}$  до максимально возможной величины  $5300\text{ м}^3/\text{ч}$  на один вагон.

Вне эксплуатации, т. е. когда поезд без пассажиров находится в отстое, объем циркулирующего воздуха снижается до минимума, а отопление включается лишь циклически на короткое время. Для этого используются специальные режимы поддержания тепла и предварительного обогрева. По соображениям экономии энергии циклическое включение отопления в пассажирских салонах практикуется лишь при низкой наружной температуре. При высокой температуре используется режим предварительного вентилирования, при котором в салонах циклически включается вентиляция.

#### Установка кондиционирования воздуха

Установки кондиционирования служат для поддержания комфортной температуры в кабинах машиниста при высокой наружной температуре или воздействии прямого солнечного излучения. Приборы подготовки и охлаждения воздуха размещены под кузовом в условиях значительного дефицита свободного пространства. Холодильный блок установки мощностью  $3\text{ кВт}$  разработан и изготовлен австрийской компанией *Liebherr Verkehrstechnik*. В зимний период он обеспечивает отопительную мощность  $4\text{ кВт}$  в тактовом режиме, получая питание из контактной сети напряжением  $750\text{ В}$  постоянного тока.

Схема управления установки кондиционирования получает от системы управления поездом (ZSG) информацию о занятости кабины, рабочем состоянии поезда (находится в движении или стоит). Во время отстоя поезда установка кондиционирования предотвращает понижение температуры в кабинах ниже  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При низкой наружной температуре установка, находящаяся в режиме предварительного обогрева, устанавливает в кабине поезда температуру  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Если наружная температура высокая, установка в режиме предварительного охлаждения снижает температуру в кабине до  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Техническое обслуживание и диагностика

Для обеспечения качественного, простого и экономичного технического обслуживания поездов электрическая часть выполнена в модульном виде, обеспечивающем хорошую доступность всех компонентов для обслуживания, возможность быстрой замены, механическую прочность конструкции и большой срок службы. Система диагностики дает возможность быстро локализовать неисправности,

установить их причину, своевременно устранить, предотвратив более масштабные нарушения.

Диагностическая информация является базой для принятия эффективных профилактических мер по техническому обслуживанию и обеспечивает низкие затраты жизненного цикла поездов серии С.

Система управления поездом в непрерывном режиме накапливает информацию о рабочих параметрах всех контролируемых компонентов поезда, регистрирует сообщения об отказах всех наиболее важных компонентов системы управления и регулирования, выводя соответствующие сообщения на дисплей в кабине машиниста.

Запротоколированные в хронологическом порядке сообщения о неисправностях доступны для последующего анализа. Эта информация является базой для быстрого обнаружения и устранения неисправностей в депо.

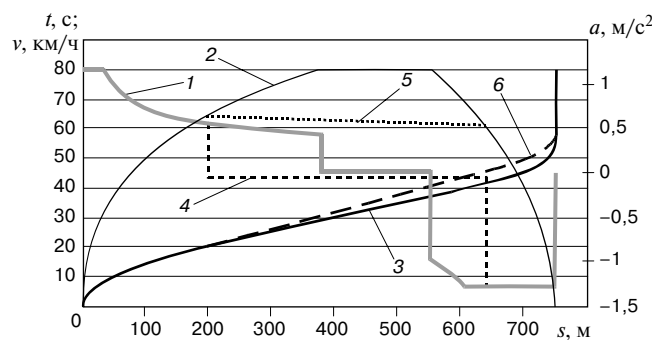
Кроме того, ведется сбор статистических данных, например о потреблении энергии или срабатывании защит или отдельных контакторов. Эти данные также используются при реализации профилактических мер по техническому обслуживанию.

В поезде предусмотрены три уровня диагностики:

- неисправности классов от А до D фиксирует система управления поездом, преобразующая сообщения для отображения их на дисплее машиниста вместе с рекомендациями в плане дальнейших действий;
- ZSG дополняет все сообщения об отказах датой и точным временем поступления, что необходимо обслуживающему персоналу, имеющему доступ к этой информации через специальный сервисный разъем;
- запоминающее устройство с аналоговыми и цифровыми каналами протоколирует все происходящие в тяговых агрегатах процессы в течение длительных отрезков времени и помещает информацию в оперативную память, имеющую резервное батарейное питание. Емкость этой системы может быть увеличена путем подключения дополнительных запоминающих устройств.

На диагностическом сервере системы управления поездом и специальном диагностическом блоке контроля наиболее важных компонентов с собственной системой управления размещены централизованные сервисные разъемы, к которым обслуживающий персонал может подключать сервисный ноутбук или специальный монитор, позволяющие значительно снизить затраты на техническое обслуживание наиболее важных компонентов.

Диагностические данные, сохраненные системами ZSG и ASG, могут быть обработаны и отображены с помощью программного обеспечения *Sibas-Expert*. Информация от остальных контролируемых объектов, подключенных к информационным шинам, в ходе эксплуатации может накапливаться в



**Рис. 8. Характеристики ходовых качеств поезда:**  
*a* — ускорение; *v* — скорость; *s* — путь; 1 — кривая изменения ускорения при движении без резерва времени; 2 — то же, скорости; 3 — то же, времени хода; 4 — кривая изменения ускорения при движении с резервом времени 7%; 5 — изменение скорости при наличии резерва времени 7%; 6 — кривая времени хода с резервом 7%

специальном запоминающем устройстве, управляемом системой ZSG. При этом может обрабатываться также информация устройств, несовместимых с системой Sibas.

Программа Sibas-Expert анализирует все данные, полученные от устройств, совместимых с системой Sibas, выделяет информацию о сбоях или неисправностях и подготавливает ее для передачи обслуживающему персоналу. Для ускорения подготовки к техническому обслуживанию обработанная программой диагностическая информация о неисправностях передается из поезда в диспетчерскую депо еще при въезде на деповские пути.

### Типовые испытания и приемка

Поезда серии С прошли полный комплекс стендовых и эксплуатационных испытаний. Некоторые виды испытаний, которые не нужно было проводить на путях заказчика, например измерение уровня излучаемого шума, выполнялись на специально оборудованных участках испытательного центра компании Siemens в Вегберг-Вильденрате. Для этих испытаний в 2001 г. использовали два предсерийных образца.

В рамках допуска проведено в общей сложности 132 вида типовых испытаний, из которых 73 выполнила сама компания-изготовитель Siemens Transportation. Помимо проверки надежности основных поездных систем, обеспечивающих безопасность движения в различных эксплуатационных ситуациях и при разных вариантах составности, проведены испытания токовых цепей тяговых и вспомогательных устройств с проверкой их нагрузочной способности. Кроме того, испытывалась тормозная система, про-

верялась устойчивость к термическим нагрузкам тормозного резистора, а также элементов силовой электроники в различных нагрузочных режимах.

Особое внимание было уделено вопросам электромагнитной совместимости всех компонентов поезда.

### Ходовые качества

В ходе проверки ходовых качеств необходимо было подтвердить, что поезд на линиях мюнхенского метрополитена с максимальным расстоянием между станциями 750 м при полной загрузке (массой 268 т) проходит прямой перегон, расположенный на площадке, не более чем за 60 с. При этом он должен выходить на максимальную скорость 80 км/ч. При затрате времени на остановку 20 с маршрутная скорость получается равной 35 км/ч.

Как порожний шестивагонный поезд (массой 164 т), так и полностью загруженный должны при этом развивать при разгоне ускорение продолжительного режима 1,3 м/с<sup>2</sup> (рис. 8). Полностью загруженным считается поезд, в котором заняты все места для сидения, а плотность размещения пассажиров, едущих стоя, составляет 3,3 чел./м<sup>2</sup>.

Аналогичные требования предъявляются и к замедлению поезда, которое в длительном режиме должно быть постоянным и равным 1,3 м/с<sup>2</sup>. Правда, в этом случае полностью загруженным считается поезд, в котором плотность распределения пассажиров, едущих стоя, составляет 5 чел./м<sup>2</sup> при полной занятости мест для сидения.

### Использование сил сцепления

На специально подготовленном участке пути испытательного центра в Вегберг-Вильденрате была проверена эффективность защиты от юза и боксования и проведена ее оптимизация. Кроме того, исследованы режимы разгона и торможения поезда при разных значениях коэффициента сцепления.

Исследования показали, что новая система тягового привода, для которой характерным является режим движения с минимальными проскальзываниями в контакте колесо — рельс, обеспечивает требуемые параметры разгона и замедления поездов серии С на открытых участках при экстремальных погодных условиях.

Все поезда серийной партии, поступающие на сеть метрополитена Мюнхена, проходят эксплуатационные испытания в течение 12 недель.

*B. Birnfeld, B. Mayer. Glasers Annalen, 2005, № 6/7, S. 226 – 244.*