

Если новая концепция эксплуатации городской железной дороги Берна потребует объединения в один состав поездов GTW компании RM и RABe 525 (Nina) компании BLS, то потребуются замена автосцепки на базе стандарта BLS и соответствующее согласование электрических соединений.

Ввод в эксплуатацию и техническое обслуживание

До декабря 2004 г. планировалось распространить поезда GTW на всю сеть компании RM за исключением линии Лангенталь — Вольхузен. После перехода на зимний график движения предполагали начать эксплуатацию поездов большой составности GTW 2/8 на маршруте S44 городской железной дороги от станций Лангнау и Вилер через Бургдорф и Берн до станции Росхойзерн с формированием в Бургдорфе поездов, идущих на ответвление. Поезда меньшей составности GTW 2/6 планировали ввести в обращение на линии Золотурн — Мутье.

С вводом в эксплуатацию сочлененных поездов стала возможной реализация новой концепции технического обслуживания. Все работы по техническому обслуживанию, а также уборка вагонов и мойка поездов проводятся в депо Бургдорф, где также планируется строительство нового депо. Уборка в вагонах проводится и в других пунктах сети RM.

Капитальный ремонт

Капитальный ремонт выполняется в депо Обербург компании RM с периодичностью 6 лет или после пробега 850 тыс. км. Все депо RM оптимально приспособлены для технического обслуживания сочлененных поездов (типа GTW или других) по следующим причинам:

- подача поезда на ремонтные пути осуществляется без помощи трансбордера, имеющего ограничения по длине состава;
- устройство для опускания тележек позволяет быстро заменять их без подъема вагонов поезда;
- осмотр отдельных компонентов проводится по потребности, независимо от ревизии тележек.

Экономия затрат на техническое обслуживание обеспечивают следующие факторы:

- небольшая потребность в резерве подвижного состава;
- меньшие затраты на работы в ночное время;
- небольшая численность персонала депо.

Техническое обслуживание поездов проводится на базе планирования с применением электронной обработки. Все работы выполняются квалифицированными специалистами.

H. Hubli et al. Eisenbahn-Revue, 2003, № 11, S. 498 – 503.

Опытный участок новой транспортной системы в Падерборне

Университет Падерборна (Германия) разработал новую рельсовую транспортную систему, в которой пассажиров и грузы перевозят автономные транспортные единицы. Тяговый привод этих транспортных единиц базируется на линейном двигателе, для регулирования которого требуются разнообразные информационные и телекоммуникационные устройства. Испытания новой транспортной системы ведутся на опытном участке в Падерборне с 2004 г.

Большие затраты времени на перевозку по железным дорогам являются причиной того, что пока не удается передать им достаточную часть грузо- и пассажиропотоков с автомобильного транспорта. Даже в

пассажирских перевозках дальних сообщений средняя маршрутная скорость не превышает 100 км/ч, если пункты отправления и назначения непосредственно не связаны высокоскоростной линией. В грузовых перевозках скорость доставки в значительной степени снижается из-за потерь времени на формирование и расформирование поездов на сортировочных станциях.

Эти слабые стороны железнодорожного транспорта могут быть исключены при эксплуатации новой транспортной системы, разработанной в университете Падерборна. Ее концепция, получившая название Neue Bahntechnik Paderborn, характеризуется следующими свойствами и особенностями:

- вместо поездов для перевозки пассажиров и грузов применяются автономные экипажи. Эти тран-

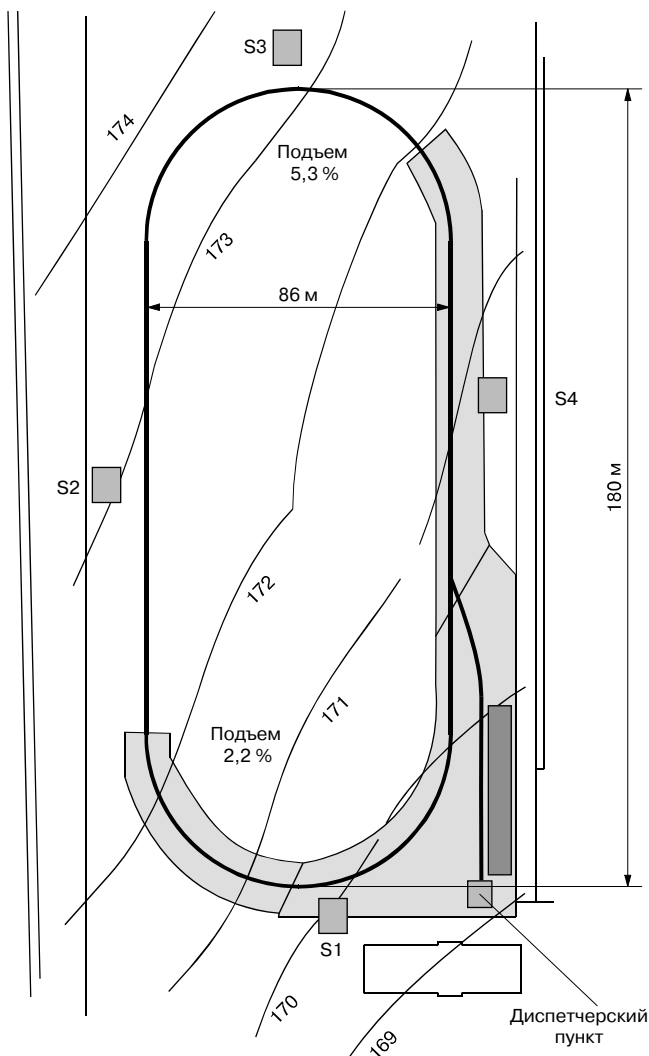


Рис. 1. План опытного участка:

S1 – S4 — пункты питания; 169 – 174 — повысотные отметки местности

спортные единицы, получившие название Shuttle, обращаются не по графику, а в зависимости от потребности и следуют фактически без промежуточных остановок от станции отправления до станции наз-



Рис. 2. Опытный экипаж Shuttle

начения. Благодаря этому отпадают типичные для традиционной железнодорожной системы затраты времени на пересадки в пассажирских перевозках и формирование/расформирование поездов в грузовых. Это позволяет обеспечивать значительное сокращение времени доставки без увеличения скорости движения;

- на загруженных участках все экипажи движутся с одинаковой скоростью, например 160 км/ч, и объединяются в группу без разделения на грузовые и пассажирские, региональные или дальнего следования;

- для обеспечения необходимой надежности комплексной системы в качестве тягового привода используются линейные двигатели, которые позволяют развивать большую силу тяги бесконтактным способом, не имеют подвижных частей и, следовательно, работают без износа;

- поскольку обычные стрелочные переводы не обеспечивают быстродействия, необходимого для отклонения на боковой путь одного из экипажей движущейся группы, необходимо применять пассивные стрелки, экипажи с одноосной ходовой частью и активной направляющей системой;

- ходовая часть должна быть оснащена гидравлическим устройством, которое играет роль рессорного подвешивания и обеспечивает нужный наклон кузова в кривых.

Для изучения взаимодействия всех компонентов, которое имеет место при эксплуатации одного экипажа, а также для исследования взаимного влияния одновременно движущихся нескольких экипажей при университете Падерборна построен опытный участок в масштабе 1 : 2,5 (рис. 1). Общая длина участка 530 м. На нем есть уклоны и оборудована одна стрелка для формирования групп экипажей и изучения их движения.

Кроме диспетчерского пункта и главного распределителя, на участке есть четыре станции питания, на которых расположены устройства электроснабжения линии. На участке могут обращаться до трех экипажей длиной по 3 м и массой 1,1 т (рис. 2).

Линейный двигатель

Для того чтобы можно было формировать группы экипажей, обеспечивать их движение и расформирование, необходимо, чтобы несколько экипажей на одном и том же участке могли двигаться с разной скоростью. Добиться этого на линии с линейным синхронным двигателем, как в транспортной системе Transrapid с использованием поездов на магнитном подвесе, невозможно. Для этого нужны асинхронные двигатели в различном исполнении.

На опытном участке исследуют два варианта асинхронных линейных двигателей (рис. 3), которые имеют одинаковые экипажные части, но разные по мощности и стоимости стационарные устройства.

Асинхронный линейный двигатель двойного питания с длинным статором

Это вариант особо мощного двигателя, обеспечивающего значительную гибкость использования, так как обе его части имеют многофазные обмотки, которые можно питать независимо одна от другой. Такой двигатель наиболее выгодно применять на участках с высокой загрузкой или с большим числом крутых подъемов и спусков. Кроме того, такой двигатель двойного питания не только имеет преимущество, характерное и для синхронного линейного двигателя, а именно возможность распределения тяговой мощности по длине участка (развернутого статора), но также обеспечивает подачу питания в бортовую сеть движущейся части из неподвижной, т. е. из развернутого статора. Поэтому на опытном участке нет ни контактной подвески, ни контактного рельса.

Сила взаимодействия между развернутым статором и экипажем F_L возникает в системах с вращающимся и линейно перемещающимся полями благодаря взаимодействию этих магнитных полей, которые создаются током статора $i_S = i_{sd} + ji_{sq}$ и током ротора $i_L = i_{Ld} + ji_{Lq}$. Выражение для этой силы имеет вид

$$F_L = -3\pi L_{SL} \lim\{i_S i_L^*\} / 2\tau_p, \tag{1}$$

где L_{SL} — индуктивность связи между обмотками статора и ротора; i_L^* — конъюгированная величина i_L ; τ_p — полюсное деление.

Эта величина постоянна во времени, если токи статора и ротора имеют постоянные модули и постоянный фазовый угол. Это тот случай, когда частота статора f_S и частота ротора f_L подчиняются условию $f_S = f_L + f_M$. В этом выражении величина f_M представляет собой частоту, с которой экипаж (ротор) проходит пару полюсов. Частота f_M определяет величину линейной скорости экипажа

$$v_M = 2\tau_p f_M. \tag{2}$$

Выразив f_M в соответствии с приведенным ранее условием для частот, получим

$$v_M = 2\tau_p (f_S - f_L). \tag{3}$$

При заданной величине частоты статора f_S скорость каждого экипажа можно устанавливать в соответствии с частотой его роторной обмотки.

Поскольку в режиме движения группой роторные обмотки нескольких экипажей взаимодействуют с одним и тем же полем статора, протекающий в его обмотке ток, создающий это поле, является естественным опорным параметром. Он выбирается с учетом характеристик роторных обмоток всех экипа-

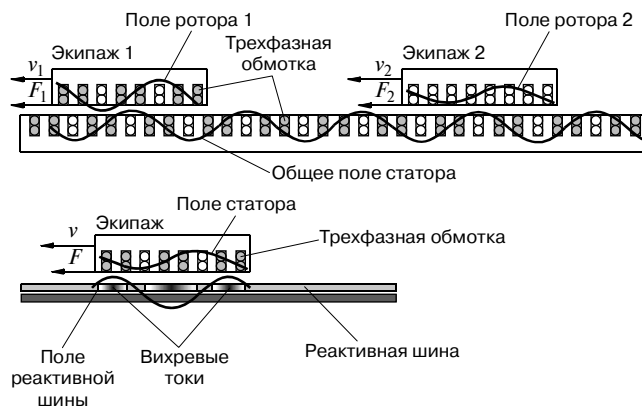


Рис. 3. Принцип действия линейного двигателя с длинным статором (вверху) и с коротким статором (внизу):
 v — скорость движения экипажа; F — сила тяги

жей, и его пространственный вектор i_S при моделировании и регулировании линейных двигателей образует опорную ось системы координат, общей для роторных обмоток всех экипажей. Таким образом, вектор тока статора не имеет q -компоненты, т. е. $i_{sq} = 0$ и $i_{sd} = i_S$. Для силы, которая воздействует на ротор одного экипажа, получается выражение

$$F_L = -3\pi L_{SL} i_S i_{Lq} / 2\tau_p. \tag{4}$$

Поскольку произведение $i_S i_{Lq}$ при неизменных параметрах линейного двигателя зависит от требований, предъявляемых к этой силе, для определения рабочей точки используются:

- d -компонента тока ротора, которая не участвует в создании силы тяги. С целью минимизации потерь регулирование производится таким образом, чтобы $i_{Ld} = 0$;
- соотношение i_S / i_{Lq} , участвующее в формировании значения силы тяги и используемое для оптимизации рабочей точки с различными целями;
- скорость линейно перемещающегося поля, которая используется для регулирования потока энергии в линейном двигателе.

Мощность P_L , подводимая через воздушный зазор в роторную обмотку, определяется силой тяги F_L , действующей на ротор, и линейной скоростью v_{FL} , с которой поле роторной обмотки движется относительно ротора. Если учитывать потери мощности в роторной обмотке, то для мощности P_B , передаваемой в бортовую сеть при условии синусоидальности тока ротора с эффективным значением I_L , получается выражение

$$P_B = P_L - 3R_L I_L^2 = F_L v_{FL} - 3R_L I_L^2. \tag{5}$$

Таким образом, мощность, передаваемая в бортовую сеть, может регулироваться с помощью скорости скольжения, которая согласно уравнению (2) пропорциональна частоте ротора. Мощность имеет положительный знак, если линейный двигатель в режиме тяги работает в досинхронном режиме и при торможении — в надсинхронном.

Линейный асинхронный двигатель с коротким статором

Поскольку размещаемая на экипаже часть линейного двигателя представляет собой обмотку с линейно движущимся полем, она может служить в качестве статора асинхронного линейного двигателя с коротким статором, в котором в путь вместо развернутого статора уложена пассивная реактивная шина. Такое решение является экономически наиболее выгодным и может использоваться на линиях, где к двигателю предъявляют ограниченные требования. На опытном участке в Падерборне реактивная шина уложена в зоне стрелки, а также на прямолинейном участке перед площадкой отстоя.

Линейный двигатель с реактивной шиной можно регулировать лишь через статорную обмотку, расположенную на экипаже. В связи с этим два оставшихся параметра, упоминавшиеся ранее, для регулирования не используются. Так, сила тяги создается только в досинхронном режиме, при котором поле статорной обмотки линейно перемещается в направлении, противоположном движению экипажа. Для обеспечения оптимального уровня потерь при создании силы тяги необходимо, чтобы в реактивной шине действовало поле с частотой f_{kipp} , соответствующей точке опрокидывания асинхронного линейного двигателя с коротким статором. При положительной силе тяги линейно перемещающееся магнитное поле движется относительно реактивной шины со скоростью

$$v_{FR} = -2\tau_p f_{kipp}. \tag{6}$$

Недостатком двигателя с коротким статором является то, что тяговая мощность, необходимая для экипажа, должна быть передана в его бортовую сеть. Для этого нужно, чтобы в поезде был мощный накопитель энергии или чтобы бортовая сеть получала питание из контактного рельса. Поскольку на опытном участке отрезки линии с коротким статором имеют относительно небольшую длину, от контактного рельса отказались.

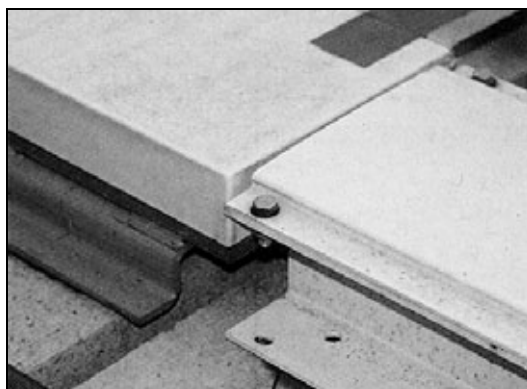


Рис. 4. Место стыкования реактивной шины (справа) и обмотки длинного статора (слева)

Стыкование участков с длинным и коротким статором

При движении экипажа по участкам с различными типами линейного привода рабочая часть двигателя, установленная на экипаже и в дальнейшем называемая ротором, попеременно взаимодействует с длинным статором и реактивной шиной (рис. 4). В этой ситуации силы тяги, создаваемые зонами с коротким и длинным статором, не должны действовать встречно. В связи с этим частота тока, питающего длинный статор, устанавливается на время перехода такой, чтобы она соответствовала характеристикам двигателя с коротким статором.

Электроснабжение

Питание обмотки длинного статора

Как и в системе Transrapid, длинный статор опытного участка разделен на секции, которые получают питание лишь тогда, когда на них находится экипаж. Однако питание здесь осуществляется не с помощью пар преобразователей, переключаемых контакторами, а отдельными преобразователями, постоянно подключенными к своим статорным секциям. Это решение рассматривается как оптимальное с точки зрения затрат.

Для того чтобы установить досинхронный режим, необходимый для передачи энергии в бортовую сеть экипажа, следует задать такое значение частоты статора f_s , чтобы оно было выше частоты f_M , соответствующей скорости движения экипажа v_M . Для удовлетворения этого условия необходимо значительное повышение напряжения, что требует использования инвертора более высокой установленной мощности.

Вопрос целесообразности передачи энергии с помощью линейного двигателя требует дополнительных экономических исследований. Такие исследования будут проводиться с учетом оптимизации технических устройств подвижного состава и инфраструктуры рассматриваемой системы.

Бортовая сеть

Схема бортовой сети приведена на рис. 5. Роторные обмотки тележек F1 и F2, размещенные на экипаже, и двигатель M для привода гидравлического агрегата получают питание от трехфазных инверторов WR1 – WR5, которые, в свою очередь, питаются от промежуточного звена постоянного напряжения ZK.

Надежность электроснабжения обеспечивается резервированием питания аккумуляторной батареей

АВ, которая связана с промежуточным звеном через регулятор постоянного тока S1. Этот накопитель энергии в режиме длинного статора должен заряжаться через роторные обмотки экипажа, а в режиме короткого статора расходовать накопленную энергию на тягу. Для того чтобы пики энергии, возникающие при разгоне и торможении экипажа, можно было использовать для заряда накопительного устройства, в его схему в дополнение к аккумуляторам ввели батарею двухслойных конденсаторов большой емкости КВ. Напряжение, необходимое для их зарядки, устанавливается регулятором S2 на уровне 62,5 В. Дополнительно этот регулятор используется для распределения потока энергии между батареями аккумуляторов и конденсаторов.

Для питания устройств бортовой электроники ВЕ напряжение аккумуляторной батареи понижается до 24 В с помощью регулятора постоянного тока S3.

Устройства регулирования и связи

Диспетчерский пункт

Работой опытного участка управляет компьютер диспетчерского пункта, выполняющий также контрольные функции. С помощью радиосвязи он обменивается информацией с компьютерами, расположенными на экипаже и на линии (рис. 6). С диспетчерского пункта по беспроводной локальной сети W-LAN запускаются внешние компьютеры и относящиеся к ним устройства, а также передаются генерируемые команды на отдельный экипаж или их группу. В обратном направлении идет информация, содержащая ряд важных параметров, используемых для контроля и диагностики. Структурированная система, приведенная на рис. 6 и используемая для обмена информацией, образует базу для автономного регулирования экипажей и обеспечивает возможность исследований, направленных на оптимизацию автоматизированного эксплуатационного процесса.

Регулирование тягового привода

Непосредственное регулирование тягового привода осуществляется на движущемся экипаже, причем с помощью последовательных шлейфов меняют величину тока роторных обмоток i_L , силу F_M и скорость v_M . При движении группы экипажей добавляются дополнительные шлейфы, с помощью которых варьируют параметр x_M , отражающий положение экипажа на линии (рис. 7).

На участках с длинным статором с помощью регулирования, осуществляемого со стороны экипажа с учетом запасенной в бортовой сети мощности P_B , формируются задаваемые значения тока статора $i_{S\text{ Soll}}$

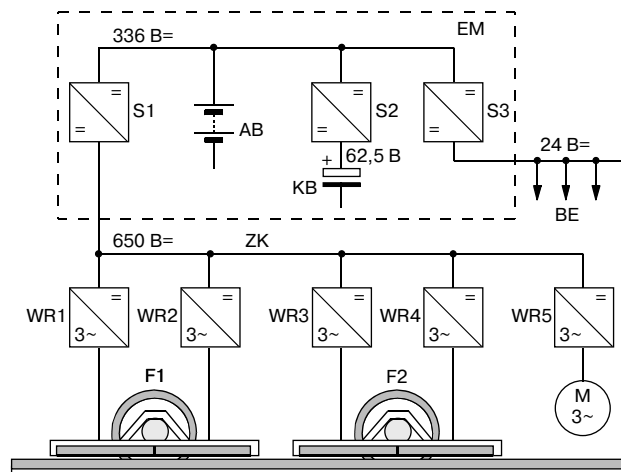


Рис. 5. Бортовая сеть экипажа:
EM — модуль энергоснабжения; S1 – S3 — преобразователи постоянного тока; ВЕ — бортовая электроника; ZK — промежуточное звено постоянного напряжения; WR1 – WR5 — трехфазные импульсные инверторы; F1, F2 — тележки с роторными обмотками

и частоты $f_{S\text{ Soll}}$. Эта информация через последовательные интерфейсы и по дуплексным радиоканалам, работающим на частоте 2,4 МГц, передается на линейные тяговые преобразователи, которые питают конкретные секции длинного статора, на которых находится экипаж или группа экипажей. Для обеспечения беспрепятственного перехода экипажа или группы с одной секции на следующую преобразователь покидаемой секции и заранее активизированный преобразователь следующей синхронизируются с помощью информационной шины CANopen.

Сила тяги регулируется на экипаже путем установки задаваемого значения тока ротора $i_{L\text{ Soll}}$. Для обеспечения с минимальными потерями такого регулирования в режиме длинного статора на экипаже должна быть в наличии информация о мгновенной координате линейно перемещающегося поля ротора и о модуле и фазовом угле вектора тока статора, на

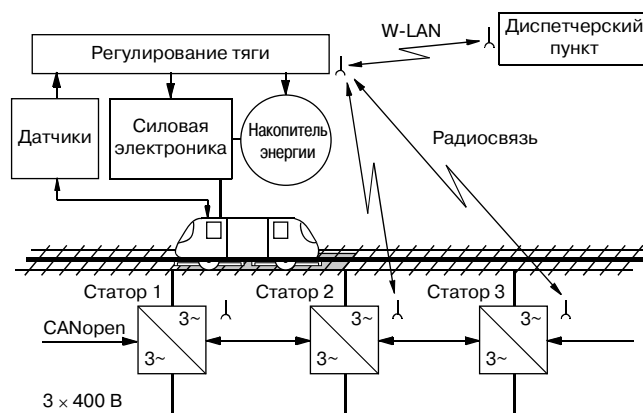


Рис. 6. Структура системы обмена информацией на участке с длинным статором:
W-LAN — беспроводная локальная сеть; CANopen — информационная шина

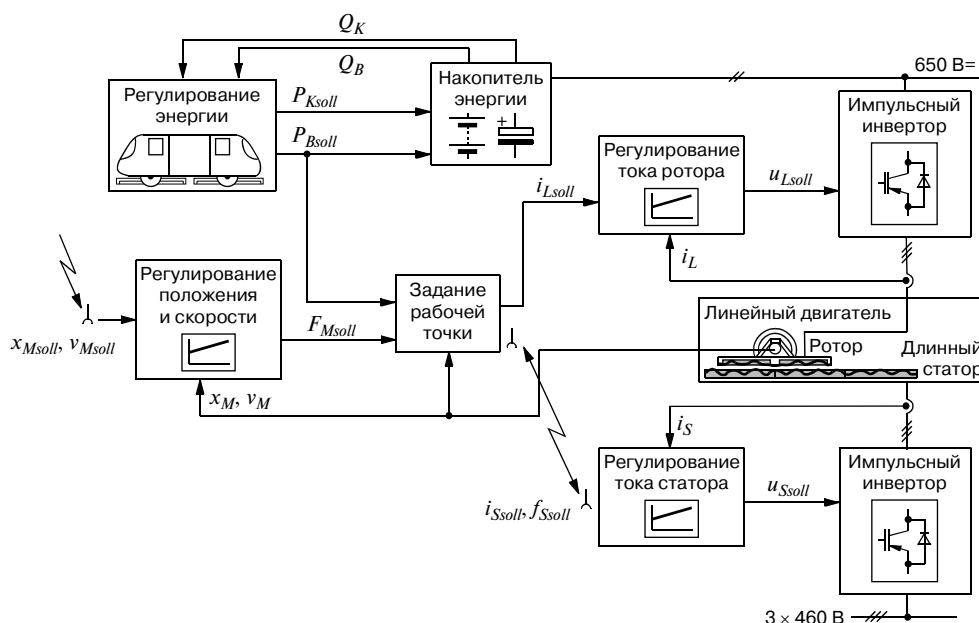


Рис. 7. Схема регулирования тягового привода:

Q_K — энергия, накопленная конденсаторной батареей; Q_B — то же, аккумуляторной батареей; P_{Ksoll} — задаваемое значение мощности, отдаваемой конденсаторной батареей; P_{Bsoll} — то же, аккумуляторной батареей

который ориентирована принятая система координат. Для передачи в цепь длинного статора задаваемого значения частоты тока формирование ее путем изменения фазового угла вектора следует производить на экипаже. При этом нужно учитывать время прохождения радиосигнала, зависящее от характеристик тракта его передачи.

На отрезках пути с реактивной шиной величины силы тяги и магнитного потока должны регулироваться по известному принципу, ориентированному на параметры поля. Исследуется также альтернативный метод регулирования силы тяги и магнитного потока, основанный на изменении величины скольжения. Как показали предварительные стендовые исследования, последний метод будет более устойчивым к изменениям параметров, например, вызванным разрывом реактивной шины в зоне стрелочного перевода.

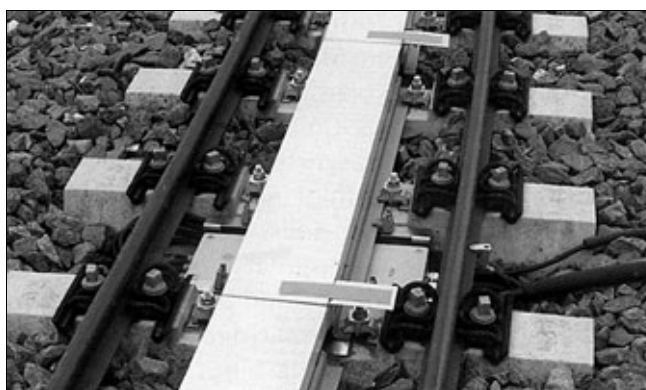


Рис. 8. Участок опытной линии с длинным статором на щебеночном балласте

Верхнее строение пути опытного участка

Опытный участок в масштабе 1 : 2,5 имеет замкнутую форму и состоит из прямолинейных участков, кривых, а также станционной и стрелочной зоны. Кривые имеют радиус 40 м, причем переход к прямолинейным участкам выполнен в виде клотоиды. На участке, ширина колеи которого равна 600 мм, уложены рельсы типа S14. Максимальный уклон пути составляет 5,3 %.

Для того чтобы создать условия, близкие к эксплуатационным, часть пути уложили на щебеночный балласт, а часть — на основание из бетонных плит, играющих роль шпал, смонтированное на эстакаде из стальных конструкций. На рис. 8 показан участок пути на балласте с длинным статором, уложенным между рельсами. На рис. 9 можно видеть участок кривой с эстакадным путем на плитном основании, к которому с помощью зажимов крепятся рельсы и обмотка длинного статора. Плиты основания опираются на стальные конструкции эстакады через полимерные подкладки, позволяющие компенсировать температурные удлинения сваренных рельсовых плетей. Маркеры, установленные вдоль пути с определенным шагом, служат для контроля и корректировки процесса измерения пути по числу оборотов колеса.

Программа испытаний

Для исследования всей системы запланирован большой объем экспериментов. Прежде всего будут изучены общие характеристики линейного двигателя. Кроме процессов тяги и торможения, подлежит исследованию

дованию также передача энергии в бортовую сеть экипажа. Поездки по испытательному участку должны показать, что экипаж с линейным тяговым двигателем в состоянии преодолевать значительно бóльшие подъемы, чем традиционный тяговый подвижной состав.

Опытный экипаж оборудуется системой наклона кузова и активной системой рессорного подвешивания с соответствующими датчиками и устройствами обработки информации. Ходовая часть представляет собой одноосную тележку с вращающимися на оси колесами и системой активного направления в колее. На раме тележки установлена дополнительная рама системы наклона кузова в кривых.

В рамках разработанной программы планируют изучение взаимодействия всех компонентов указанных систем, предварительно исследованных на стендах, и их последующую оптимизацию на базе результатов исследования. В ходе испытаний максимальная скорость экипажа составит 10 м/с (36 км/ч), а ускорение при разгоне достигнет 1 м/с².

Из соображений экономии энергии автономные экипажи планируется эксплуатировать в виде групп.



Рис. 9. Участок с длинным статором на эстакаде

На опытном участке можно будет изучить как соединение в группу, так и отклонение отдельных экипажей на ответвление. Параметры участка позволяют одновременно эксплуатировать до трех опытных экипажей. При этом особое значение придается изучению процессов активного направления тележек в колее при использовании пассивных стрелок.

H. Grotstollen et al. Elektrische Bahnen, 2004, № 6, S. 243 – 248.

Демонстрационная система на магнитном подвесе со сверхпроводящими магнитами

*Демонстрационная система, получившая название *Supra Trans-Demonstrator*, предназначена для исследования возможностей транспортной системы на магнитном подвесе, в которой используются мощные магниты с высокотемпературной сверхпроводимостью. На первом этапе такие магниты решено испытать в системах подвеса и направления.*

За последнее время исследования в области мощных сверхпроводящих магнитов продвинулись далеко вперед, благодаря чему появилась реальная возможность использования их в транспортных системах. Проект *Supra Trans* должен дать ответ на вопрос о возможности реализации систем подвеса и направления на базе сверхпроводящих магнитов. Должны быть также разработаны условия применения их в транспортных системах.

Демонстрационный экипаж используется для проведения серий испытаний всех основных компонентов

системы: путевой структуры, линейного тягового привода, системы передачи энергии, а также устройств управления и обеспечения безопасности движения.

В рамках проекта запланирована проработка следующих системных аспектов:

- концепции и конструкторского решения надежной путевой структуры на базе постоянных магнитов и электромагнитов;
- тягового привода, действующего бесконтактно и, следовательно, без износа, конструктивно скомпонованного с системами подвеса и направления;
- экипажа, причем особое внимание должно быть уделено нагрузкам, вызванным поперечными силами, а также режимами движения, сопровождающимися галопированием и рысканием;
- энергоснабжения, в том числе сверхпроводящих магнитов, линейного привода и вспомогательных систем;
- концепции обеспечения безопасности пассажиров или сохранности груза;