

Двухэтажный поезд с системами компенсации боковой качки и радиальной установки осей

В ближайшие 20 лет в Швейцарии ожидается прирост пассажиропотока до 50%, в связи с чем SBB разработали требования к двухэтажным поездам FV-Dosto. С другой стороны, принятая федеральным правительством программа ZEB («Перспективное развитие железнодорожной инфраструктуры») поставила цель создать на SBB сеть крупных узлов, расположенных так, чтобы время хода поезда от любого из них до соседнего не превышало 1 ч, что требует инновационных решений для сохранения высокой скорости в кривых. Компания Bombardier разработала проект двухэтажного поезда, оснащенного системами компенсации боковой качки FLEXX Tronic WAKO и радиальной установки колесных пар в кривых ARS. Этот поезд способен решить задачи, поставленные в программе ZEB, и предотвратить чрезмерный износ путей при использовании двухэтажного подвижного состава.

Разработка и внедрение поезда FV-Dosto означают увеличение на 40% вместимости поездов за счет использования двухэтажных вагонов, уменьшение времени нахождения в пути благодаря применению системы компенсации боковой качки кузовов в кривых. Увеличение пропускной способности линий достигается за счет сокращения времени на текущее содержание пути и реализуемой программы модернизации инфраструктуры.

Классические активные системы наклона кузовов, установленные на поездах ICN (рис. 1) или Pendolino, реализованы в виде отдельной механики, встроенной между вторичным рессорным подвешиванием и кузовом вагона. Эти системы не могут быть использованы в двухэтажных поездах, поскольку пассажиры второго этажа испытывали бы неприятные ощущения и даже недомогание. Кроме того, наклон двухэтажного вагона мог привести к нарушению габарита, т. е. к столкновению с вагонами встречного поезда или с близко расположенными строениями.

Замена эксплуатируемых двухэтажных поездов одноэтажными с наклоняемыми кузовами вагонов резко снизило бы общую провозную способность. Инфраструктурными

мероприятиями задачи, поставленные программой ZEB, также нельзя решить из-за слишком больших инвестиций и труднопреодолимых проблем с экологией.

В связи с этим компания Bombardier разработала так называемую систему компенсации боковой качки FLEXX Tronic WAKO, которая регулирует наклон кузова в пределах от 0,65 до 1 град только за счет рессор вторичного подвешивания.

Принципиально эта технология не нова. В Японии разрабатывались системы регулирования наклона с использованием сжатого воздуха, но они оказались нежизнеспособными.

Потребность в подвижном составе с компенсацией боковой качки Федеральные железные дороги Швей-



Рис. 1. Поезд ICN компании Bombardier на южной рампе Сен-Готарда

царии (SBB) ощутили еще в конце 1990-х годов, а в 1991 г. на сети уже проводились типовые испытания системы компенсации боковой качки Neiko, разработанной компанией SIG.

Здесь впервые был применен принцип фиктивного маятника. Последний представляет собой систему рычагов, образующих трапецию. Благодаря им линии действия направляющих штанг пересекаются выше центра тяжести кузова, образуя мгновенный центр приложения момента, воздействующего на кузов. Однако фиктивный маятник обладает высоким внутренним сопротивлением, для преодоления которого необходимы дополнительные элементы, так как для нужной степени компенсации боковой качки действия одних центробежных сил недостаточно. Для того чтобы избежать применения привода для активного регулирования, потребовались необычные решения: был использован аккумулятор энергии в виде дополнительной рессоры с отрицательной жесткостью, который решил проблему пассивной компенсации боковой качки на базе фиктивного маятника.

Рассматриваемая система, однако, оказалась слишком жесткой для

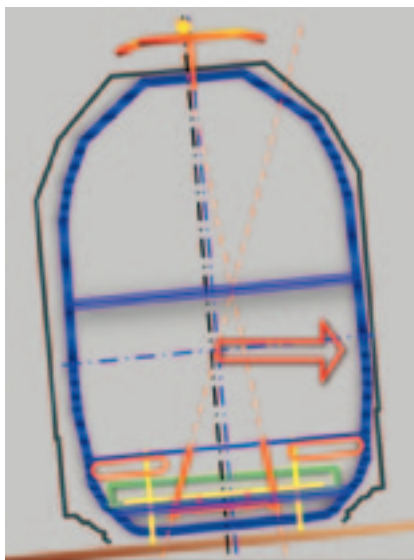


Рис. 2. Принцип работы системы FLEXX Tronic WAKO

того, чтобы обеспечить необходимую плавность хода. В связи с этим дополнительно потребовалось поперечное (третичное) подрессоривание, включенное последовательно с фиктивным маятником.

Эффективность полученной системы, а также все характеристики, определяющие увеличение провозной способности, повышение безопасности и надежности, улучшение плавности хода и безотказность, подтвердили полученные результа-

ты испытаний. Они показали, что в кривых обеспечиваются повышение скорости движения на 15%, высокая плавность хода и отсутствие у пассажиров неприятных ощущений, которые имеют место в поездах с активной системой наклона кузовов.

Тем не менее, несмотря на такие положительные результаты, системе не стали развивать дальше, так как в то время стояла задача повышения скорости движения моторвагонных поездов в кривых на 25%.

Система компенсации FLEXX Tronic WAKO

При разработке требований к новому двухэтажному моторвагонному поезду концепции FV-Dosto с распределенной тягой и осевой нагрузкой 20 т можно было просто скопировать систему Neiko. Однако из-за чисто пассивного принципа компенсации необходимы относительно большие поперечные смещения между кузовом и тележками, что было нежелательно для двухэтажных поездов с точки зрения габаритов и компоновки и вообще нереализуемо для моторных тележек в конфигурациях двухэтажных поездов того времени. Существующие сегодня технологии активных систем открывают широкие возможности для создания высокоэффективных современных разработок, привлекательных для клиентуры. Замена пассивного накопителя энергии в системе Neiko активным регулирующим устройством позволила создать систему компенсации боковой качки.

В швейцарском отделении компании Bombardier (Винтертур), специализирующемся на разработке тележек, непосредственно для SBB разработана современная система компенсации боковой качки FLEXX Tronic WAKO с характеристиками, какие никогда раньше не достигались (рис. 2, 3).

Система дает возможность ограниченного регулирования наклона

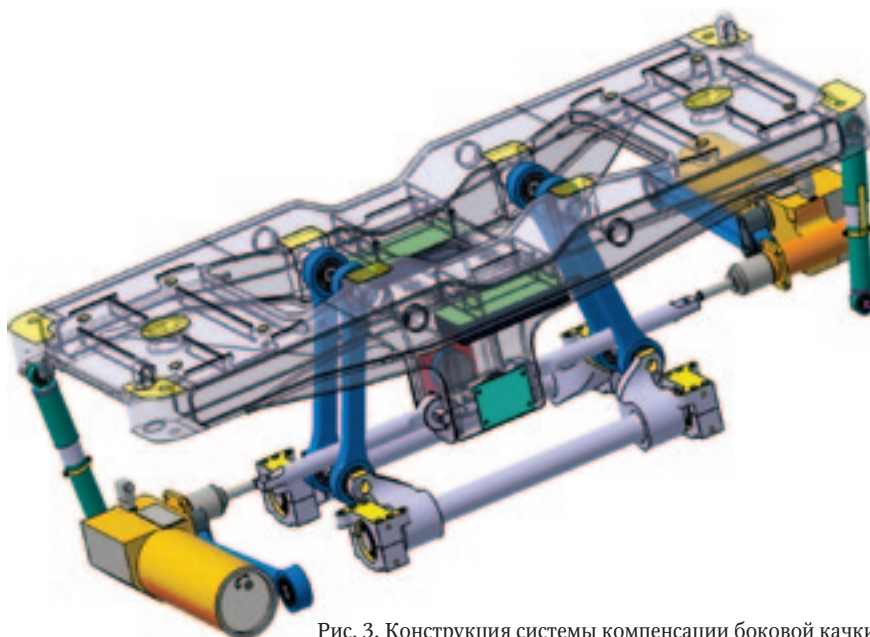


Рис. 3. Конструкция системы компенсации боковой качки

кузова. В этом случае кузов вагона фактически остается перпендикулярным к плоскости пути, что обеспечивает прохождение кривых с повышенной скоростью. Такой поезд, необходимый SBB для междугородных сообщений, обеспечивает высокую плавность хода и минимальную нагрузку на путь.

Критическими параметрами для нового поезда являются плавность хода при входе в кривую и выходе из нее, а также нагрузка на путь при максимальной осевой нагрузке 145 кН, поперечной силе 60 кН и боковом ускорении $1,3 \text{ м/с}^2$.

Базой для компенсации боковой качки послужил уже известный принцип фиктивного маятника, характеризующегося безотказной работой. Высокое внутреннее сопротивление фиктивного маятника обеспечивает естественное для него самоцентрирование системы при отказе тягового привода. Кузов вагона при любых эксплуатационных условиях остается в пределах габаритного профиля, так же как и токоприемник, который сохраняет контакт с подвеской в любых рабочих ситуациях.

Работа маятника поддерживается одним актуатором, а плавность хода — другим, воздействующим на систему активного поперечного поддрессоривания. Оба актуатора имеют одинаковую конструкцию и поэтому взаимозаменяемы в случае отказа одного из них. Так, если выйдет из строя актуатор маятника, его заменит актуатор поперечного поддрессоривания. В результате лишь незначительно ухудшится плавность хода, но на скорость движения это никак не повлияет.

Данная система, единственная в своем роде и запатентованная Bombardier, совместно с резервированным исполнением всех наиболее важных системных компонентов обеспечивает в 10 – 15 раз более высокую надежность, чем классические системы наклона кузова (например, одноэтажного поезда

ICN, обращающегося на сети SBB). Компания Bombardier ожидает лишь один отказ системы в течение 2 лет эксплуатации парка из 400 вагонов.

Меньшая механическая сложность, достигнутая несмотря на резервированное исполнение, обеспечила снижение капитальных затрат, позволила создать более компактную тележку с уменьшенным расстоянием между колесными парами. Последнее обстоятельство способствует уменьшению массы, а следовательно, и снижению сил взаимодействия между подвижным составом и путем. Расчеты, выполненные компанией Bombardier, показали, что внедрение поездов с системой FLEXX Tronic WAKO



Рис. 4. Поезд TWINDEX Swiss Express, оснащенный системами FLEXX Tronic WAKO и ARS (модель, источник: Bombardier)

даст тот же эффект, что и проведение дорогостоящих и длительных мероприятий по улучшению инфраструктуры.

FLEXX Tronic WAKO и концепция ZEB

В программе перспективного развития инфраструктуры ZEB Федеральные железные дороги Швейцарии определяют все узкие места в инфраструктуре и системе перевозок, прогнозируют потенциал рынка перевозок и общий по сети экономический эффект от реализации мероприятий, предусматриваемых программой. Официальное принятие ее состоялось в сентябре 2009 г. В рамках этой программы в течение 20 лет должно быть реализовано

более 100 проектов, на которые выделяется 5,4 млрд. швейц. фр. На первом этапе программы будет освоено 2,7 млрд. швейц. фр.

Оптимальное решение полевой концепции ZEB может быть достигнуто лишь при условии интегрированного рассмотрения системы график движения — подвижной состав — инфраструктура. Вследствие квадратичной зависимости поперечного ускорения от скорости движения поездов по криволинейным участкам пути оптимальным будет увеличение скорости в кривых на 15%. Дальнейшее повышение приведет лишь к снижению устойчивости движения при незначительном уменьшении времени хода.

Ввод в эксплуатацию и оптимальное использование поезда концепции FV-Dosto, получившего название TWINDEX Swiss Express (рис. 4) и оснащенного системой FLEXX Tronic WAKO компании Bombardier, позволят решить основные задачи концепции ZEB на 10 лет раньше заданного срока и уменьшить на 200 млн. швейц. фр. инвестиции в инфраструктуру.

Одной из задач программы ZEB является сокращение времени хода поездов до 1 ч в сообщении Берн — Лозанна с превращением Лозанны в узловую станцию. Возрастание на 10% спроса на железнодорожные перевозки без увеличения числа поездов в результате решения указанных в программе проблем позволит улучшить коммерческие показатели SBB.

ДВУХЭТАЖНЫЕ ПОЕЗДА



Рис. 5. Междугородный двухэтажный поезд IC 2000

Проблема спрос — предложение на железной дороге вряд ли может быть успешно решена в Швейцарии без использования поезда концепции FV-Dosto. Такие основные удельные показатели, как затраты, масса и длина поездов в расчете на одного пассажира, уже вряд ли могут снизиться. Однако в случае использования двухэтажных поездов приходится считаться с повышением осевой нагрузки и, соответственно, увеличенным воздействием поезда на путь. В результате ситуация с финансированием инфраструктуры становится еще более острой.

Для того чтобы замедлить процесс сокращения таких инвестиций, остановить его или даже повернуть

в обратную сторону, нужна такая модель формирования тарифов на пользование инфраструктурой, которая обеспечивала бы максимальную совместимость подвижного состава, принадлежащего арендатору, с предоставляемой ему инфраструктурой и была бы составной частью применяемого метода финансирования. Подобные модели уже несколько лет используют в Великобритании и в ближайшем будущем планируют применять в Швеции. Обе модели во многом сходны между собой. Они мотивируют разработку подвижного состава, щадяще воздействующего на путь, и тем самым способствуют улучшению состояния инфраструктуры.

Таблица 1

Сравнение характеристик поездов, оснащенных системами радиальной установки колесных пар в кривых

Параметр	Серия или тип поезда			
	EW-IV	IC 2000	Dosto с рашетом колебаний виляния	Dosto с системой ARS
Осевая нагрузка, т	12	17	20	20
Необремененная масса, кг	1500	1825	2000	2000
Жесткость направления колесной пары в кривой, кН/мм	продольная	6	8	1
	поперечная	5	5	5

Математическое выражение шведской и британской моделей состоит из трех компонентов:

- осадка пути, зависящая исключительно от вертикальной нагрузки на колесо;
- усталость компонентов пути, например рельсов и креплений, зависящая от сил взаимодействия между колесом и рельсом, действующих в вертикальном и горизонтальном направлениях;
- износ и усталостные явления контакта качения, которые зависят только от условий сцепления в контакте колесо — рельс.

Если принять, что в физическом отношении модель в основном пригодна для инфраструктуры железных дорог любой страны, а различия между отдельными компонентами могут быть отображены с помощью разных коэффициентов затрат, то указанную модель можно применять повсеместно для выявления общих зависимостей и тенденций. Если же модель не может быть применена для формирования тарифов на пользование инфраструктурой, то в этом случае ее можно использовать для оценки затрат на текущее содержание пути.

Сравнительный расчет тарифов на пользование инфраструктурой линии Берн — Лозанна при условии применения на ней поездов трех серий (EW-IV, IC 2000 и FV-Dosto) показал, что для варианта с поездом концепции FV-Dosto удельные затраты, необходимые для текущего содержания пути, на 70–80% выше, чем с поездом серии EW-IV. Однако в случае оснащения поезда FV-Dosto тележкой FLEXX Tronic WAKO с активной системой радиальной установки колесных пар и стабилизации их хода в кривых (ARS) разработки Bombardier этот показатель становится на 15% ниже, чем у поезда EW-IV.

В случае дооборудования ходовой части поездов EW-IV и IC 2000 (рис. 5) системой ARS удельные затраты на текущее содержание инфраструктуры снизятся со-

ответственно на 85 и 60%. Естественно, эти данные должны быть пересчитаны для каждой линии на весь эксплуатируемый парк. Таким образом, ввод в эксплуатацию подвижного состава, щадяще воздействующего на инфраструктуру, способствует коренному изменению ситуации с затратами на текущее содержание пути и других инфраструктурных объектов. Расчеты, выполненные Федеральной службой транспортного планирования Швейцарии (SMA), показали, что благодаря применению системы FLEXX Tronic WAKO с ARS можно уменьшить на 200 млн. швейц. фр. в год инвестиции в инфраструктуру.

Для линий, изобилующих кривыми, применение подвижного состава с тележками, оборудованными системой FLEXX Tronic WAKO с ARS, обеспечивает также снижение энергопотребления, которое может достигать 2–3% в расчете на один поезд. Это является существенным вкладом в выполнение одной из задач проекта ZEB, предусматривающей общее по сети SBB снижение энергопотребления на 10%.

Система FLEXX Tronic WAKO с ARS

Конфликт между условиями движения подвижного состава в кривых и на прямолинейных участках имеет такую же давнюю историю, как и сами железные дороги. Жесткое направление колесных пар в кривых, малые радиусы и неоптимальный подбор профилей колеса и рельса ведут к следующему:

- слишком большим силам в контакте колесо — рельс и, соответственно, значительному износу обоих компонентов контактирующей пары;
- повышенному сопротивлению движению качения, что обуславливает повышенный расход энергии на тягу;
- генерированию шума;
- усталостным явлениям на поверхностях катания колес и рельсов.



Рис. 6. Электропоезд Regina в проекте Grönatåget («Зеленый поезд»)



Рис. 7. Тележка электропоезда Regina, оборудованная системой ARS

В то же время для обеспечения устойчивого движения экипажа на прямолинейных участках необходима пониженная жесткость направления колесных пар. Появление резинометаллических элементов позволило создать пассивные механические системы радиальной установки колесных пар в кривых, имеющие, однако, ряд недостатков. Разработанная активная система впервые позволила коренным образом решить проблему.

Основной принцип, заложенный в мехатронную систему активной радиальной установки колесных пар и стабилизации их движения в кривых (ARS), — это первичное ресурсное подвешивание с очень низкой жесткостью, которое позволяет колесным парам радиально устанавливаться в кривых без высоких возвращающих усилий. Каждая колесная пара в такой системе оборудована дополнительным высокодинамичным поводковым устройством. Букса одного конца колесной

пары жестко фиксируется от перемещений в продольном направлении, в то время как вторая букса соединяется с продольным поводком электрогидравлического актуатора, закрепленного на раме тележки. В табл. 1 приведены сравнительные технические данные поездов, оборудованных системой FLEXX Tronic WAKO, в том числе с ARS.

В отличие от пассивной системы радиальной установки мехатронная система ARS имеет значительно упрощенную механику за счет:

- индивидуального активного направления в кривой каждой колесной пары;
- радиальной установки колесной пары с учетом геометрии кривой;
- более жесткого динамического регулирования для повышения устойчивости движения;
- надежной, саморегулирующейся электронной системы;
- повышенной надежности актуаторов и резервированного исполнения электронных устройств;
- высокой отказоустойчивости во всем диапазоне изменений скорости.

На рис. 6 показан шведский электропоезд Regina в проекте Grönatåget компании Bombardier, а на рис. 7 представлена его тележка, оснащенная системой ARS. Этот поезд был использован для испытаний в рамках допуска системы ARS к установке на пассажирском подвижном составе Швеции, эксплуатирующемся в скоростном диапазоне до 200 км/ч. В этой системе вращающийся актуа-

Таблица 2

Затраты на установку системы FLEXX Tronic WAKO с ARS и экономия энергии

Параметр	Подуклонка рельсов	
	1:20	1:40
Капитальные затраты, тыс. евро	155,1	215,9
Экономия энергии в год на один поезд, МВт·ч	4226	5881
Стоимость сэкономленной энергии, тыс. евро	11,3	15,7

тор создает продольное усилие, передаваемое на соответствующий конец колесной пары, в результате чего последняя поворачивается на определенный угол относительно вертикальной оси. При этом актуатор выполняет регулирующие функции в реальном времени, если нарушается нормальное качение колесной пары из-за продольного дефекта пути.

Суть этого регулирования заключается в разделении возмущений на две частотные области, характеризующиеся разным поведением колесной пары. Если система находится в низкочастотной области, которая характерна для моментов входа и выхода из кривой, происходит радиальная установка колесной пары. В высокочастотной области каждое возмущение, вызванное неровностью пути, компенсируется противодействием актуатора, в результате чего движение колесной пары нормализуется.

Благодаря этому тележка почти никогда не переходит в режим извилистого движения, вызывающего нестабильность хода и обычно подавляемого на современном подвижном составе. При движении в кривой оба частотных режима регулирования дополняют друг друга, благодаря чему ход колесных пар не нарушается дефектами пути. Каждая колесная пара регулируется независимо от других. Активная стабилизация движения позволяет отказаться от гасителей колебаний виляния и фрикционных элементов между тележками и кузовом, которые в обычной ходовой части предотвращают извилистое движение тележек.

Что касается вагона в целом, то наличие системы ARS в конструкции

тележек значительно уменьшает количество связей между тележками и кузовом, передающих шум и вибрацию, что позволяет снизить уровень генерируемого шума более чем на 4 дБ (А). Кроме того, исключение гасителей колебаний виляния позволило отказаться от дополнительных усиливающих элементов и консолей в конструкции ходовой части и кузова, снизив за счет этого их массу.

Важным моментом также является снижение уровня шумоизоляции пассажирских салонов. Таким образом, система ARS дает следующие преимущества:

- снижение удельных затрат на текущее содержание пути на 60–85%;
- уменьшение энергопотребления на 2–3% (табл. 2);
- снижение массы вагона благодаря отказу от гасителей колебаний виляния;
- уменьшение уровня излучаемого шума благодаря отсутствию гасителей колебаний виляния;
- отсутствие резких шумов в крутых кривых;
- высокая устойчивость к отказам;
- самоадаптация к различным параметрам пути (совместимость);
- скорость до 350 км/ч с пониженным динамическим воздействием на путь.

Электронные устройства и актуаторы

Для регулирования и контроля систем FLEXX Tronic WAKO и ARS Bombardier разработала надежную, не требующую ухода электронную архитектуру, специально созданную для тяжелых условий, в которых работает ходовая часть подвижного

состава. Из соображений эксплуатационной готовности все электронные компоненты выполнены резервированными. Для регулирующих компьютеров каждой тележки имеются дублирующие, постоянно находящиеся в «горячем резерве», так что нарушение работы и даже отказ одного из компонентов не ухудшат работы всей системы. Интегрированная система самодиагностики распознает нарушения в работе компонентов еще до их отказа и передает соответствующее сообщение на диспетчерский пульт. Благодаря этому неисправный модуль может быть оперативно заменен по прибытии поезда в пункт назначения. При этом системе свойственны функции самоконфигурирования и самоадаптации. Так, после замены какого-либо датчика его характеристика оценивается системой и приводится в состояние, не требующее дополнительной юстировки и настройки.

Актуаторы, используемые в системе FLEXX Tronic WAKO с ARS, являются совместной разработкой компаний Liebherr-Aerospace и Bombardier. Это — электрогидравлические актуаторы современной, но уже испытанной технологии. Такой исполнительный механизм применен на аэробусе A380. Вращающийся актуатор оснащен циклоидальным редуктором, серийно выпускаемым компанией Moog. Блок контроля датчиков также является серийным продуктом, который поставляет бельгийская компания Televic.

Благодаря модульной концепции, позволяющей интегрировать в одном актуаторе функции систем FLEXX Tronic WAKO и ARS, а также реализовать интеллектуальную схему резервирования, удалось добиться высокой надежности при оптимальных расходах.

По материалам компании Bombardier; By Rail. Now!, 2009, S. 54–55; Eisenbahn-Revue, 2009, № 11, S. 556–559; Schweizer Eisenbahn-Revue, 2009, № 4, S. 198–199; www.bahnonline.ch.