

# Продольные силы в длинносоставных грузовых поездах

В связи с прогнозируемым ростом спроса на транспортные услуги, экологической необходимостью и конкуренцией с другими видами транспорта повышение эффективности грузовых перевозок должно стать в будущем основным направлением развития железных дорог. В настоящее время многие компании, осуществляющие железнодорожные грузоперевозки, ищут новые пути повышения их объема на базе существующей инфраструктуры. Поскольку проектирование, строительство или реконструкция инфраструктуры потребовали бы больших временных и финансовых затрат, реально осуществимые и не требующие больших капиталовложений технические решения вызывают повышенный интерес.

Длинносоставные поезда (длинной более 1 км) — это уже апробированное средство, обеспечивающее возможность значительного повышения пропускной способности существующих линий. Особенно хорошо такие поезда зарекомендовали себя на американском рынке. Использование их в Европе связано с целым рядом дополнительных проблем, обусловленных европейскими условиями эксплуатации. Особое значение имеют процессы разгона и торможения, поскольку при этом значительно возрастают продольные силы.

## Возникновение продольных сил в поезде

### *Динамика продольных сил*

Продольные силы в поезде при эксплуатации длинносоставных поездов играют решающую роль, поскольку от них зависят безопасность движения, провозная способность и износ подвижного состава. Величина продольных сил в решающей степени зависит от характеристик пневматического тормоза. В глав-

ной воздушной магистрали изменения давления распространяются со скоростью звука. В связи с этим временной сдвиг момента срабатывания или отпуска тормозов в отдельных вагонах создает в составе продольные силы. Разница во времени срабатывания тормозов и, соответственно, величина продольной силы тем больше, чем длиннее поезд. Тормозной путь у длинносоставных поездов также больше из-за неодновременного срабатывания тормозов. Слишком высокие значения продольной силы в экстремальных случаях могут вызвать сход подвижного состава с рельсов или разрыв поезда. Кроме того, неблагоприятное действие продольных сил ведет к повышенному износу вагонов. Чтобы не допускать возникновения чрезмерно высоких продольных сил, необходимо надежно контролировать тормозную систему поезда.

### *Тормозная система грузового вагона*

В 1920-х годах пневматическая система торможения становится стандартной для грузовых

вагонов. Они оборудованы автоматическим однокамерным пневматическим тормозом непрямого действия. Такой тип тормоза в Европе соответствует нормам МСЖД. Для этого все вагоны оборудуются сквозным трубопроводом для сжатого воздуха или главной тормозной магистралью.

Главная тормозная магистраль выполняет в составе следующие задачи:

- передает команды торможения;
- пополняет воздушные резервуары;
- обеспечивает автоматическое срабатывание тормозов.

Иными словами, главная тормозная магистраль служит для того, чтобы, во-первых, обеспечить тормоза энергией, необходимой для их работы, а во-вторых, передать команду на включение или отпуск тормозов.

Основным элементом тормозной системы грузовых вагонов является воздухораспределитель, который контролирует изменения давления в главной тормозной магистрали и дает необходимые команды: высокое давление в магистрали соответствует недостаточному давлению в тормозных цилиндрах — тормоза отпущены. При понижении давления в магистрали воздухораспределитель повышает давление в тормозных цилиндрах, что соответствует торможению (рис. 1).

В США или в Австралии, где на тормоза не распространяются нормы МСЖД, грузовые поезда обычно оборудуются тормозами однократного отпуска. При этом продольные силы в поезде не так велики, поскольку полный отпуск тормозов возможен при малой временной константе. Это преимущество, однако, влечет за собой и системные недостатки — исключает возможность ступенчато дозированного отпуска тормозов и повторного экстренного торможения.

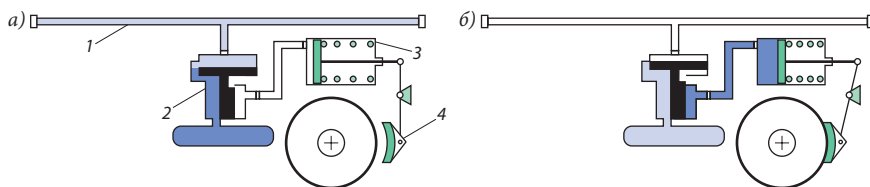


Рис. 1. Принцип действия непрямого тормоза:

*a* – тормоз отпущен; *b* – тормоз включен; 1 – главная тормозная магистраль; 2 – воздухохораспределитель; 3 – тормозной цилиндр; 4 – тормозная колодка

Тормоз отпущен, когда давление в главной магистрали имеет установленную величину 5 бар. Для включения режима торможения давление в главной магистрали должно понизиться. При снижении его на 1,5 бар, т. е. до давления в магистрали 3,5 бар, сила торможения достигнет максимального значения. Дальнейшее снижение давления может только ускорить срабатывание тормозов отдельных вагонов, но тормозное усилие при этом не повышается. Поскольку соединение главной тормозной магистрали с атмосферой в случае расцепления состава приводит к автоматическому торможению обеих его частей, такая тормозная система называется автоматической.

Самое важное свойство воздухохораспределителя системы МСЖД заключается в возможности ступенчатого торможения и отпуска. Последнее позволяет называть схему торможения, построенную на его основе, системой многократного отпуска. Воздухохораспределитель МСЖД имеет дополнительную камеру управления. Как в процессе торможения, так и при отпуске сравнивается разница давлений камеры управления и главной тормозной магистрали с давлением воздуха в тормозных цилиндрах. Благодаря этому отпуск тормозов можно осуществлять ступенчато, а также выбирать наиболее эффективную ступень торможения (рис. 2).

Грузовые поезда в Европе как в ближней, так и в дальней перспективе будут оборудоваться пневматическими тормозными системами многократного отпуска. Чтобы

иметь возможность надежно и эффективно эксплуатировать длинно-составные грузовые поезда, необходимо в полном объеме иметь представление о тормозной системе и возможностях ее оптимизации для каждого конкретного случая.

### Контроль продольных сил в поезде

Одна из возможностей контроля продольных сил состоит в том, чтобы идентифицировать применение в каждом конкретном случае концепций реализации тормозных и тяговых режимов. Известной мерой при этом является реализация тормозов разного типа. Различают медленнодействующий тормоз (тип G) и быстродействующий (тип P). Главное различие между этими типами тормозов заключается в длительности процессов торможения. Манипулируя этим параметром, можно понизить величину продольных сил, действующих в поезде.

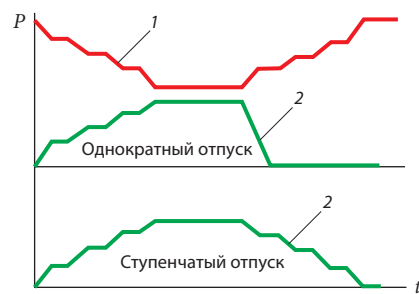


Рис. 2. Изменение в функции времени давления в главной магистрали и тормозном цилиндре в процессе торможения и отпуска:

*P* – давление; *t* – время; 1 – главная магистраль; 2 – тормозной цилиндр

Другой возможностью ограничения продольных сил может быть, например, двустороннее торможение поездов. Тем самым достигается равномерное распределение тормозных сил. Очень длинносоставные поезда могут вести несколько локомотивов, обеспечивающих необходимую силу тяги. В Европе на железнодорожных участках горного профиля общепринято использование тяги по системе многих единиц. Если локомотивы распределены по составу (например, в голове поезда и в хвосте) и связь между ними осуществляется по радио, имеется возможность включать или отпускать тормоза с обоих концов поезда практически одновременно. Это упрощает и ускоряет выполнение операций по ведению поезда и в значительной мере уменьшает величину продольных сил.

В дополнение к мерам, связанным с выбором концепции систем торможения, в помощь машинистам длинносоставных поездов разработаны дополнительные устройства, которые в критических ситуациях способны взять на себя часть функций машиниста. В качестве такого эффективного вспомогательного средства может быть использовано устройство Fahrerassistenzsysteme.

Альтернативой ограничению максимальной длины грузового поезда с целью уменьшения величины продольных сил может служить такая очевидная мера, как повышение скорости передачи команды на торможение. Поскольку в чисто пневматической системе это физически невозможно, предлагается использовать электрическую передачу информации по всей длине поезда, как, например, принято в тормозных системах пассажирских поездов. Такая технология получила название ЕСР (пневматическая тормозная система с электронным управлением). В этом случае, кроме пневматической магистрали, прокладывается также и электрическая, снабженная межвагонными соединениями. Не-

смотря на значительные эксплуатационные преимущества, в Европе эта система пока не получила развития. В США, Канаде, Австралии и ЮАР она уже давно применяется в нерасцепляемых поездах постоянной составности.

### *Оптимизация концепции тормозной системы длинносоставных поездов путем моделирования*

Для обоснования выбора комплексной тормозной системы для длинносоставных поездов наряду с изучением накопленного опыта обязательным является проведение детальных исследований. В качестве одного из самых важных инструментов исследований следует назвать моделирование продольных сил в поезде. Ввиду необходимости принятия ряда допущений и упрощений эффективность чисто цифровых моделей достаточно ограничена. Если требуется получить реальные данные о функционировании пневматической тормозной системы в поезде, необходимо провести соответствующие измерения на испытательном стенде.

Компания Knorr-Bremse (Мюнхен) располагает исследовательским центром для испытаний всех наиболее важных тормозных систем (системы МСЖД для 100-вагонных поездов, американской системы AAR для 150-вагонных поездов и российской системы Матросова для 120-вагонных поездов). Измерительные поездки для определения характера изменений продольных сил в поезде были бы очень дорогостоящими, поскольку для измерений необходимо оснастить состав соответствующим метрологическим оборудованием. Кроме того, возможности испытаний в ситуациях, близких к критическим, ограничены.

По сравнению с измерениями в реальном поезде испытательный стенд дает существенные преимуще-

ства в отношении стоимости испытаний, управления процессом и возможности повторного воспроизведения граничных условий. Возможности воспроизведения и обобщения результатов испытаний при ходовых испытаниях ограничены, кроме прочего, эксплуатационными условиями и характером инфраструктуры, например наличием уклонов, разными значениями сопротивления движению.

На испытательном стенде можно моделировать действие тормозной системы в поезде длиной до 1500 м с тормозным краном машиниста и пневматическим тормозным оборудованием вагонов, практически соответствующим реальному. На каждом вагоне имеются тормозная магистраль, межвагонные соединительные рукава, запасной воздушный резервуар, воздухораспределитель и тормозной цилиндр в виде подлинных компонентов. Длина и поперечное сечение трубопроводов соответствуют реальным величинам для грузового вагона. Особенностью испытательного стенда МСЖД для состава из 100 вагонов является двухтрубоводная схема — наличие главной воздушной магистрали и магистрали главного резервуара. Это позволяет значительно быстрее заполнять главный воздушный резервуар между последовательными циклами испытаний. В достаточно короткое время удается осуществить большое число испытательных серий.

Рычажная система, служащая для создания тормозных сил, моделируется цифровым способом и не является составной частью стенда. Это же относится и к вращающимся массам, а также к массе вагонов.

Все 100 вагонов испытательного стенда МСЖД оборудованы необходимыми измерительными устройствами. В зависимости от целей проводимых измерений метрологическое оборудование и состав поезда могут быть в короткое время модифицированы. Результа-

ты испытаний на стенде используются в качестве исходных данных для математических расчетов действующих в поезде продольных сил. Каждый вагон моделируется в виде точечной массы, сцепки рассматриваются в виде системы пружин и демпферов. Поведение каждого вагона описывается с помощью дифференциального уравнения второго порядка. Модель охватывает силы трения на тормозной колодке, взаимодействие сил на уклоне, силы сопротивления движению и силу тяги.

Моделирование движения возможно для участка любого профиля. Конфигурация транспортных единиц в составе и их параметры (масса, тип конкретной единицы подвижного состава, наличие автогрозового тормозного режима) могут быть гибко отображены в модели.

Расчеты позволяют определять величину продольных сил для любых возможных в эксплуатации сценариев. Современные нормы нередко создавались на основе исторического и эмпирического опыта. Они определяют предельные эксплуатационные условия с целью ограничения величины действующих в поезде продольных сил, что исключало бы опасность разрыва поезда или схода с рельсов. Посредством моделирования продольных сил в поезде можно идентифицировать и использовать имеющиеся в нормативах избыточные резервы. Стендовые испытания являются важным средством для интерпретации и гарантирования безопасности новых эксплуатационных концепций в части особо длинносоставных поездов и многократной тяги.

### *Ограничение продольных сил в поезде*

В дополнение к оптимизации пневматической тормозной системы при вождении длинносоставных тяжелых грузовых поездов требуются особая предусмотрительность и осторожность. Чтобы машинист

мог вести такие поезда, он должен не только обладать большим опытом, но и располагать обширной информацией о движении поезда. Такую дополнительную информацию может предоставить машинисту система LEADER (Locomotive Engineer Assist Display&Event Recorder). Уже в течение 10 лет система используется в особо длинносоставных поездах. В течение этого времени она оказывала большую помощь в поездной работе, позволяла избегать критических ситуаций и сокращать расходы на техническое обслуживание подвижного состава.

Как и испытательный стенд компании Knorr-Bremse, система LEADER использует моделирование поезда в реальном времени и конкретных условиях. При этом учитываются характеристики участка, включающие в себя радиусы кривых и градиенты уклонов, технические данные поезда (массу и сопротивление движению), а также эксплуатационные данные (график движения и максимально допустимая скорость на участке). Местонахождение поезда на участке определяют посредством системы GPS. С дисплея системы LEADER машинист поезда считывает полную информацию о находящемся впереди участке.

Система LEADER в непрерывном режиме рассчитывает и контролирует изменения продольных сил в поезде, а также предсказывает ожидаемую величину этих сил на следующем участке. Если величина этих сил превышает индивидуально рассчитанное предельно допустимое значение, LEADER определяет, какие потребуются меры, чтобы противостоять этому, и передает машинисту предупредительный сигнал с четкими рекомендациями по ведению, чтобы тот своевременно внес коррективы в свои действия в соответствии с реальными условиями.

В дополнение к вспомогательному дисплею в системе LEADER

предусмотрена компьютерная платформа для подготовки, обработки и сохранения данных, а также для обеспечения связи между поездом и машинистом. Установка на локомотиве системы LEADER, которую называют также помощником машиниста, не представляет сложности, она работает независимо от системы управления поездом.

Наряду с функцией управления поездом система LEADER также увеличивает возможности устройств обработки данных. С помощью радиосвязи она может выводить актуальные маршрутные данные на пульт машиниста, который таким образом получает возможность в процессе движения поезда анализировать эти данные и при необходимости оперативно принимать нужные меры. С помощью анализирующих средств системы LEADER можно провести статистическую обработку различных параметров, например динамических характеристик и процесса изменения продольных сил в поезде.

В 2009 г. Knorr-Bremse приобрела компанию SYDAC — всемирно известного поставщика тренажеров для обучения машинистов. Полученные с помощью системы LEADER рабочие данные можно использовать и непосредственно в схеме таких тренажеров. При этом в процессе тренировок могут быть реализованы как критические ситуации, так и оптимальные режимы вождения. Внедрение системы LEADER и тренажера TDS5000 компании Knorr-Bremse обеспечивает возможность непрерывно повышать качество поездной работы. Соединение этих устройств дало высокий синергический эффект, позволяющий в значительной степени повысить эффективность обучения машинистов и поездного персонала.

Наряду с преимуществами, которые система LEADER предлагает для контроля действующих в поезде продольных сил, с ее помощью можно также обеспечить зна-

чительную экономию энергии (до 15%). Благодаря этому инвестиции в систему LEADER окупаются в течение короткого времени.

### *Ограничение продольных сил в поезде посредством внедрения электропневматического тормоза*

Разработка электропневматического тормоза (ECP) означала переход на новые принципы в области техники грузовых перевозок. Предпринимавшиеся уже в течение многих лет усилия по созданию системы электронного управления тормозом в железнодорожном грузовом сообщении, обладающей всеми преимуществами в части диагностики и автоматизации, вышли из экспериментальной стадии. На железных дорогах, входящих как в состав МСЖД, так и в сферу ААР, значительные средства были вложены в реализацию проводной и беспроводной систем передачи тормозных сигналов, электронных систем управления тормозом, контроля проследования хвоста поезда и энергоснабжения в грузовых поездах.

В пассажирских поездах система электропневматического тормоза базируется на передаче команд с помощью электрических сигналов. Система ECP позволяет перенести эту технологию в область грузовых перевозок. Как в пассажирских, так и в грузовых поездах применение электропневматических тормозов обеспечит почти одновременное срабатывание их по всей длине состава благодаря передаче команд на торможение практически со скоростью света.

Одновременно с передачей команд на торможение обратным путем в систему управления поступают диагностические данные, благодаря чему машинист получает актуальную информацию о состоянии всех входящих в состав поезда тор-

мозов, что позволяет минимизировать дорогостоящие затраты на техническое обслуживание и диагностику, а также резко снижает расходы, связанные с проведением проверки тормозной системы. Преимущества электропневматической тормозной системы для грузовых вагонов наиболее очевидны при вождении особо длинносоставных маршрутных поездов, в которых вагоны не расцепляют или расцепляют очень редко.

Компания New York Air Brake, дочерняя Knorr-Bremse, вышла впервые на рынок ААР с электропневматической системой тормозов для грузовых вагонов EP60. Наряду с главным отличием, заключающимся в наличии возможности многократного отпуска, что впервые удалось реализовать в грузовых вагонах на сети ААР и получить при этом значительные эксплуатационные преимущества, были выявлены и другие важные достоинства системы:

- уменьшение длины тормозного пути;
- исключение соударения вагонов, благодаря чему уменьшается механический износ сцепок и кузовов вагонов;
- улучшенная регулируемость степени замедления ввиду непосредственного воздействия тормозов;
- сокращение расходов на техническое обслуживание ввиду наличия системы диагностики;
- сокращение времени оборота вагонов в связи с повышением средней скорости движения;
- рост объема перевозок;
- ограничение затрат на проверку тормозной системы.

В условиях реальной эксплуатации за прошедший период удалось подтвердить основанную на этих

преимуществах высокую экономическую эффективность тормозной системы ЕСР.

В конце 2005 г. грузовая компания Spoornet (ЮАР) заказала тормоза системы ЕСР для 6735 углевозных вагонов и 230 локомотивов. В связи с ростом спроса на каменный уголь эта компания, работающая на разветвленной железнодорожной сети протяженностью более 1500 км, которая соединяет угольные шахты с портами, стремилась повысить показатели эффективности путем увеличения своей провозной способности за счет ускорения оборота вагонов. При этом компания вместо закупки дополнительного числа новых вагонов и локомотивов решила внедрить систему ЕСР и инвестировать в модернизацию инфраструктуры. Дополнительный экономический эффект должно было дать сокращение энергии на тягу поездов, сокращение числа случаев схода подвижного состава с рельсов и сокращение эксплуатационных расходов.

Отличие от эксплуатирующихся на главных магистралях маршрутных поездов (составы до 200 вагонов), которые водят локомотивы, оборудованные тормозами ЕСР, на вспомогательных участках, выполняющих функцию линий подвоза, часто используются тепловозы и электровозы, на которых не всегда установлена система ЕСР.

Компания Spoornet должна была убедиться, что поезда на второстепенных участках и магистралях могут быть надежно заторможены независимо от применяемой тормозной системы локомотива. С этой целью была использована переходная система Transition Vehicle, которую устанавливали между локомотивом

с традиционными тормозами и грузовыми вагонами, оборудованными тормозами ЕСР. Эта система обеспечивала связь между чисто пневматической и электропневматической схемами управления тормозами. Данное решение может служить примером того, как при различных условиях эксплуатации и организации перевозок даже при частичном оснащении подвижного состава электропневматическими тормозами можно обеспечить надежный транспортный процесс и добиться повышения эффективности в перевозочной работе.

### Выводы и перспективы

Как с экономической, так и с экологической точек зрения грузовые железнодорожные перевозки считаются наиболее предпочтительными, по крайней мере при перевозках массовых грузов на дальние расстояния. В связи с этим следует исходить из того, что спрос на перевозки этим видом транспорта в среднесрочной перспективе снова будет расти. Чтобы оптимально использовать имеющуюся инфраструктуру, целесообразно внедрять длинносоставные поезда. Внедрение новых технических систем на подвижном составе не требует больших затрат времени и экономически гораздо эффективнее проектирования и строительства объектов новой инфраструктуры. В ближайшие десятилетия клиентура получит особо привлекательные решения проблемы железнодорожных перевозок, базирующиеся на таких системах.

*S. Schmidt et al. ZEVrail, 2009, № 9, S. 358–364; материалы компании Knorr-Bremse (<http://www.knorr-bremse.de>).*