

Энергоэффективность высокоскоростного движения

Экономия энергии стала главной целью в мировом масштабе, а в Европе поставлена задача к 2020 г. снизить вредные выбросы в атмосферу на 20% по сравнению с 1990 г. В транспортном секторе намеченные мероприятия в долгосрочном плане фокусируются на планировании развития инфраструктуры, модальном перераспределении перевозок и обновлении подвижного состава. В краткосрочном плане может оказаться полезным обучение машинистов методам вождения поездов, обеспечивающим экономию энергии на тягу.

Исходные положения

Железные дороги являются энергоэффективным видом транспорта благодаря таким системным преимуществам, как низкий коэффициент трения между колесом и рельсом, что позволяет преодолевать большие расстояния на выбеге (движение по инерции), использование электрической тяги с возможностью возврата в сеть рекуперированной энергии, возможность регулирования провозной способности в зависимости от спроса за счет изменения составности пассажирских поездов. Кроме того, железные дороги представляют собой вид транспорта с направляющей инфраструктурой, пригодный для применения компьютеризированных систем управления движением и автоматизации функций вождения поездов.

Возможности повышения энергоэффективности железнодорожной системы далеко не исчерпаны, и в настоящее время основным направлением мероприятий по снижению потребления энергетических ресурсов является совершенствование конструкций инфраструктуры и подвижного состава, а также методов управления движением.

На этапе стратегического планирования вопросы проектирования инфраструктуры должны рассматриваться в аспекте вклада в уменьшение потерь электроэнергии, расширенного использования рекуперативного торможения и повышения эффективности оперативного управления движением за счет развитых систем связи. Есть предложение использовать реверсивные тяговые подстанции, которые способны не только принимать рекуперированную энергию, но и возвращать ее в энергетические системы общего пользования, создавать электрические сети с улучшенными связями между отдельными участками, разрабатывать новые устройства для поддержания должного уровня напряжения в контактной сети и применять накопители энергии. Немаловажное значение имеет конструкция путевой структуры, сводящая к минимуму введение ограничений скорости движения поездов.

На величину расхода энергии прямо влияют параметры подвижного состава, особенно его аэродинамические характеристики, эффективность тягового привода и снижение массы тары за счет совершенствования конструкции узлов и агрегатов или применения но-

вых, более легких материалов. В общем потреблении энергии поездом необходимо учитывать постоянно растущую долю, приходящуюся на вспомогательных (нетяговых) потребителей. По результатам измерений, проведенных в поездах, обращающихся на высокоскоростных линиях Испании, эта доля в регулярной эксплуатации достигает 11%. Потребление энергии различными бортовыми системами, например установками кондиционирования воздуха, можно уменьшить путем оптимального регулирования температуры подаваемого воздуха или применения специальных режимов работы в поездах, находящихся в отстое (без пассажиров). Целесообразно также рассмотреть влияние бортовых накопителей энергии на ее потребление с учетом их характеристик и неизбежного увеличения массы тары подвижного состава.

Системы связи и такие устройства, как экспертные системы, выдающие машинисту рекомендации по режимам движения, или эффективные системы автоведения, могут улучшить управление поездом в реальном времени. Для определения фактического потребления энергии и успешного применения мер по его снижению необходимо устанавливать бортовые счетчики энергии. Наконец, принцип модульности в конструкции поездов дает возможность оперативно приводить вместимость поезда в соответствие со спросом на перевозки пассажиров, а увеличение числа мест для сидения в вагонах поездов новой конструкции ведет к снижению удельного расхода энергии в расчете на одного пассажира.

Организация движения

Сценарии совершенствования инфраструктуры и подвижного состава разрабатываются на средне- и долгосрочную перспективу и требуют крупных инвестиций. В отличие

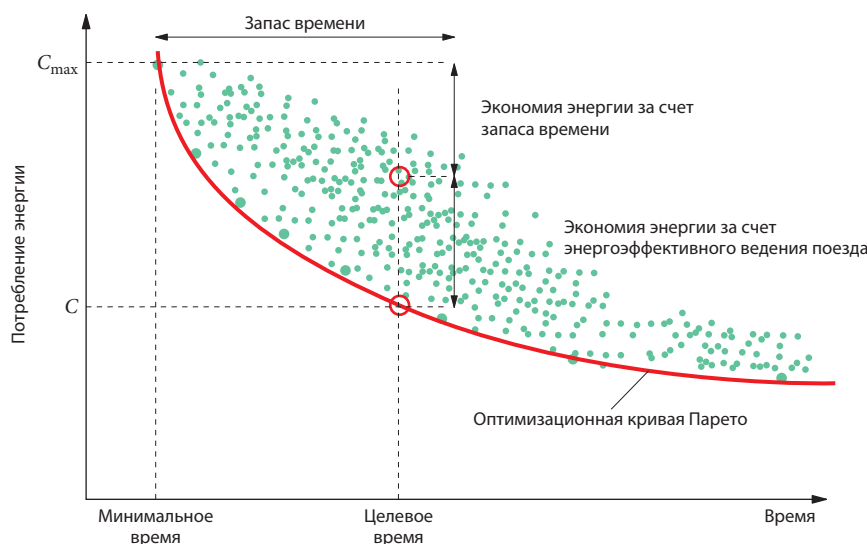


Рис. 1. Разные варианты моделирования поездки между двумя станциями

от них различные мероприятия по улучшению организации движения поездов могут быть осуществлены в течение короткого времени или даже почти сразу. При существующей инфраструктуре и имеющемся подвижном составе организационные задачи по экономному расходованию энергии можно решать с той же мерой внимания, что и эксплуатационные или коммерческие.

Стратегии организации движения высокоскоростных пассажирских поездов можно разделить на три типа в зависимости от направленности: по планированию перевозок, по разработке технологий энергоэкономичного вождения поездов (eco-driving) и по управлению движением в реальном времени.

На этапе планирования необходимо согласование спроса пассажиров на перевозки и предложений по их удовлетворению в целях достижения желаемого уровня населенности поездов. Здесь, безусловно, важен компромисс, особенно в силу того факта, что железные дороги часто рассматриваются как базовое средство обеспечения мобильности населения и общество считает, что железнодорожные сообщения хотя бы в минимальном объеме нужны независимо от того,

достаточен ли спрос на них, чтобы оправдать сопутствующие затраты (это суждение относится, в частности, к пригородным маршрутам и линиям метрополитена). Таким образом разработанные графики и расписания движения способствуют снижению потребления энергоресурсов.

При разработке графиков минимальное время движения увеличивается на некоторую величину, известную как «время восстановления», которое дает возможность соблюдать расписание даже в случае непредвиденных задержек поездов. Это время закладывается, поскольку компания-оператор должна выполнять требования по пунктуальности перевозок, но может быть также использовано для снижения расхода энергии, если поезд не опаздывает. Кроме того, необходимо учитывать, каким образом распределяется запас времени на протяжении всей поездки не только по критерию пунктуальности в соответствии с вероятным распределением задержек по всей линии, но также и по критерию эффективности использования энергии. Возможна разработка моделей, применяемых при составлении графиков движения, кото-

рые максимизируют передачу рекуперируемой энергии между поездами на одном фидерном участке. Такие модели актуальны для линий метрополитена.

На рис. 1 показаны результаты моделирования различных вариантов поездки между двумя станциями. Каждая точка на этом графике соответствует поездке с конкретными временем хода и расходом энергии. Естественно, поездка с максимальной скоростью характеризуется минимальной продолжительностью и наибольшим потреблением энергии. Видно также, что разные поездки с различным расходом энергии могут иметь одинаковое время хода. Таким образом, самой благоприятной с точки зрения расхода энергии является точка (поездка), расположенная на оптимизационной кривой Парето.

Когда при разработке расписания движения поездов выбирается определенная продолжительность поездки, экономию энергии можно получить, используя заложенный в графике запас времени. Затем может быть разработан режим ведения поезда с минимальным расходом энергии, соответствующим заданному времени хода, — режим экономичного ведения поезда, который представляет собой последовательность эффективных команд управления поездом: движение по инерции (выбег) и регулирование скорости (с торможением и без торможения). Наконец, необходимо обеспечивать определенный интервал между поездами, чтобы управление одним поездом не влияло на движение следующего.

Если конкретный поезд опаздывает и выходит из заданного графика с соответствующим режимом экономичного ведения, система регулирования движением позволяет в реальном времени планировать и вносить коррективы. Таким образом, для адаптации движения поезда к изменениям условий работы в реальном времени вводится новая

модель экономичного ведения поезда с другим времени поездки.

Можно выделить три уровня управления движением поездов:

- регулирование движения одного поезда с помощью бортовой системы, которая контролирует заданный график движения;
- регулирование с внесением изменений в график движения для адаптации в реальном времени экономичного режима ведения поезда к незапланированным ограничениям скорости или большим опозданиям;
- глобальная оптимизация движения поездов с минимизацией опозданий и расхода энергии в режиме реального времени с помощью централизованной системы управления.

Оптимальным решением является автоматическое управление движением с выдачей и исполнением соответствующих команд под контролем бортовой системы. На линиях метрополитена с глобальным регулированием движения поездов, оснащенных системами автоведения, обеспечиваются эффективное управление и благодаря ему значительная экономия энергии и точность движения. Так, измерения на метрополитене Мадрида показывают снижение на 18% расхода энергии и повышение на 50% точности соблюдения графика.

Что касается регулирования движения высокоскоростных поездов, то здесь важно обеспечить возможность модификации в реальном времени режима экономичного ведения поезда бортовой информационной системой или системой автоведения в соответствии с появлением временных ограничений скорости или опозданий.

Моделирование и испытания

Группа по исследованию железнодорожных систем мадридского университета Pontificia Comillas разработала комбинированную модель

для разработки расписания движения поездов на базе режимов экономичного вождения и применила эту модель при проведении исследований на высокоскоростных линиях Испании (рис. 2). Полученные с помощью модели режимы экономичного вождения поездов проходили проверку в условиях регулярной эксплуатации с измерением расхода энергии.

Модель экономичного вождения основана на точной имитации условий движения поездов на каждом участке пути между остановками на станциях. Различные варианты поездок на одном и том же участке пути моделировались путем набора последовательностей различных команд по ведению поезда, результатом чего были разные времена хода и, соответственно, потребление энергии. Оптимизационная кривая Парето получена как совокупность точек минимального расхода энергии для каждой продолжительности поездки. После расчета кривых Парето для каждого участка их параметры вводили в модель разработки графика движения. С помощью оптимизационной модели рассчитывали распределение запаса времени и соответствующее оптимальное расписание движения поездов.

Железные дороги Испании (RENFE) и университет Pontificia

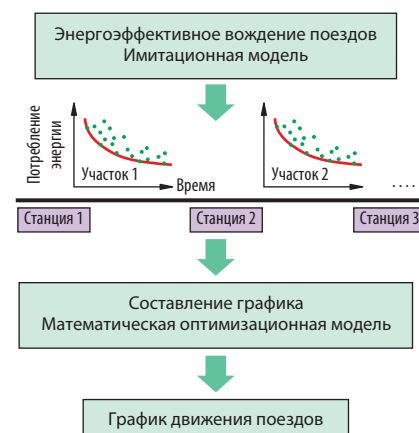


Рис. 2. Модель построения графика движения на базе имитации энергоэкономичного режима ведения поезда

Comillas совместно разработали режимы экономичного ведения электропоездов разных серий (102, 103, 100 и 120) для нескольких участков высокоскоростных линий Мадрид — Барселона, Мадрид — Малага (рис. 3) и Мадрид — Севилья.

С учетом того что целью данных исследований было получение реалистичных режимов энергоэффективного вождения поездов, применимых в условиях регулярной эксплуатации, было важно разработать достоверный метод имитирования таких режимов. Для этого необходимо было учитывать параметры инфраструктуры (временные и постоянные ограничения скорости, крутизну уклонов, радиусы кривых, возвышение наружного рельса, параметры тоннелей, нейтральных вставок контактной сети), подвижного состава (масса и длина поездов, сопротивление движению, тягово-тормозные характеристики, эффективность тормозов, рекуперативное торможение, вспомогательное оборудование) и сочетание элементов стратегии вождения (движение с постоянной скоростью, выбег, торможение).

После разработки имитационной модели для ее оценки провели предварительные испытательные поездки в ночное время, а затем в регулярной эксплуатации. Результаты измерений записывались бортовой аппаратурой, соединенной шиной связи с тяговым приводом. Регистрация проводилась через каждые 250 мс по следующим величинам: сила тяги/торможения, потребляемый/рекуперированный ток, напряжение, скорость и пройденное расстояние. Программа особых испытаний в ночное время включала движение на выбеге со скорости 300 км/ч до остановки (для расчета сопротивления движению), регулирование различных параметров при постоянной скорости и движение при постоянной силе тяги для определения эффективности работы тягового оборудования. Адми-

нистрация инфраструктуры железных дорог Испании (ADIF) участвовала в этих ночных испытаниях, измеряя расход энергии на тяговых подстанциях.

Анализировались также данные, зарегистрированные при поездках в регулярной эксплуатации, в целях получения информации о стратегиях ведения поезда без рекомендаций экспертной системы (до разработки модели экономического вождения) и в ручном режиме. По результатам этих оценочных испытаний были уточнены следующие элементы модели: тягово-тормозные характеристики, эффективность тяги и торможения, расход энергии вспомогательным оборудованием, длина нейтральных вставок контактной сети, схемы ведения поезда в ручном режиме и потери электроэнергии (во время ночных испытаний сравнение результатов измерений в поездах и на тяговых подстанциях показало потери в размере 4%).

После оценки имитационной модели были разработаны схемы энергоэкономичного вождения для выбранного участка высокоскоростной

линии, для поездов определенной серии, для того или иного вида сообщений и проведены их испытания, в ходе которых экономичное ведение поезда, поддерживаемое экспертной системой в соответствии с параметрами оптимального режима, зафиксированными в регулярной эксплуатации, сравнивалось с режимом ведения без рекомендаций экспертной системы в одинаковых условиях поездки (без опозданий).

Стратегии экономического вождения прошли испытания на линии Мадрид — Барселона в электропоездах серии 102 и 120 (изготовители — компании Talgo и CAF). Всего с июля по декабрь 2009 г. было выполнено 12 специальных ночных и 19 высокоскоростных поездок в регулярной эксплуатации.

На участке Гвадалахара — Мадрид при вождении поездов с поддержкой экспертной системы была зафиксирована экономия энергии в размере до 70% по сравнению с не сопровождаемым экспертной системой вождением поездов, следовавших без опозданий на том же участке, и до 42% на участке Калатаюд —

Сарагоса. На высокоскоростной линии Мадрид — Барселона средняя величина экономии энергии составила 21%.

Эти испытания показали, какое влияние на расход энергии оказывают оптимизированные стратегии управления подвижным составом, особенно с учетом возможности их быстрого внедрения при небольших усилиях и инвестициях.

Кроме того, проведенные испытания подтвердили, что модель может применяться для оценки новых возможностей по эффективному использованию энергии на базе применения технологий рекуперации энергии, бортовых устройств для накопления энергии с целью питания вспомогательных систем, передачи энергии между поездами и стационарными устройствами для накопления энергии, а также эффективности тяговых подстанций, способных принимать рекуперированную энергию. Таким образом, может быть получена ценная информация для анализа эффективности использования энергии в зависимости от соответствующих инвестиций. Значимость конкретной технологии может быть проанализирована индивидуально и в комбинации с другими с учетом частоты движения поездов и характеристик электрической сети.

Перспективы

Предлагаемая процедура базируется на расчете факторов эффективности для каждого энергетического сценария. На подстанции для каждого имитируемого сценария движения (например, наличие накопителя энергии на подстанции в добавление к накопителям на борту поездов) проводится расчет расхода и приема рекуперированной энергии для учета электрических потерь и энергии, возвращаемой поездами. Модель энергетического потока сначала решается без учета возвращаемой энергии. Затем она



Рис. 3. Один из участков высокоскоростной линии Мадрид — Малага

решается уже с учетом выбранной техники и сценария движения (например, межпоездных интервалов). Таким образом может быть рассчитана средняя экономия энергии для соответствующей комбинации технологий.

Фактор эффективности η_{reg_ef} отражающий среднюю величину использования возвращаемой энергии, можно определить как отношение $\Delta E_{sub}/E_{reg_pan}$, где ΔE_{sub} — экономия энергии по имитируемому сценарию, измеренная на подстанции; E_{reg_pan} — величина рекупируемой энергии, измеренная на токоприемниках поезда.

Затем может быть оценен расход энергии на один поезд со стороны подстанции $E_{cons_sub} = E_{cons_pan}/\eta_{los} - E_{reg_pan}\eta_{reg_ef}$ где E_{cons_pan} — потребление энергии поездом, измеренное на токоприемнике; η_{los} — коэффициент электрических потерь в контактной сети.

В зависимости от условий движения (величины межпоездного интервала) и комбинации сценариев степень использования рекупируемой энергии может варьиро-

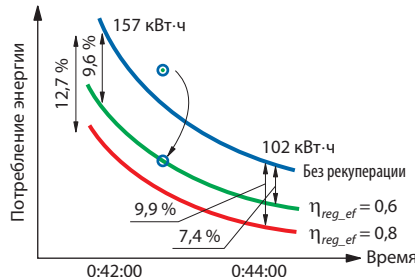


Рис. 4. Сценарии ведения поезда

ваться, а обусловленная ими экономия энергии — оправдывать или не оправдывать инвестиции в те или иные технологии. Если применяется фактор эффективности использования возвращаемой энергии, режим экономичного ведения поезда должен быть модифицирован, тогда результирующий оптимизированный сценарий ведения поезда будет состоять из новой последовательности команд с обусловленным ею изменением расхода энергии. Имитируемые поездки и результирующая кривая Парето покажут снижение расхода энергии, а выбранный режим ведения поезда для специфического времени хода не будет соответствовать оптимальному сценарию ве-

дения поезда, полученному без учета указанного фактора (рис. 4).

Таким образом, представляется обоснованным заключение, что энергоэффективность эксплуатационной деятельности железных дорог можно обеспечить не только долгосрочными стратегическими проектами по развитию инфраструктуры и обновлению парка подвижного состава, но и реализуемыми в относительно короткие сроки малозатратными мероприятиями, направленными на снижение расхода энергии на тягу поездов. Эти стратегии, оптимизирующие сценарии ведения поездов и разработку графиков движения, могут оказывать заметное влияние на эффективность работы железнодорожных систем. Испытания на высокоскоростных линиях и поездах железных дорог Испании подтвердили возможность уменьшения расхода энергии на тягу в среднем на 22%.

P. Cucala Garcia, A. Fernandes Cardador. European Railway Review, 2010, № 4, p. 46–50; WIT Transactions on The Built Environment, 2010, № 114, p. 549–560.

НОВОСТИ

Линия узкой колеи на острове Рюген

На узкоколейной линии о. Рюген, популярного места отдыха в Германии, ведутся работы по обновлению верхнего строения пути. Эта линия принадлежит компании Rügensch Bäderbahn-Rasender Roland. На ней обращается поезд на паровой тяге, составленный из старых двухосных пассажирских вагонов. В середине ноября 2010 г. компания получила разрешение на обновление участка пути длиной 2 км между станциями Филипсхаген и Гёрен. Начало работ было запланировано на середину ноября 2010 г., а завершение — на начало 2011 г., так как линия должна быть готова к началу сезона отпу-

сков. На участке уложат новые рельсы и балласт, обновят водоотводные сооружения. На эти работы выделено 1,3 млн евро, из которых 870 тыс. — из бюджета земли Мекленбург-Передняя Померания.

Инвестиции в модернизацию узкоколейной линии в Австрии

На электрифицированной линии колеи 760 мм Mariazellerbahn (Австрия), имеющей длину 85 км и связывающей Санкт-Пёльтен (центр федеральной земли Нижняя Австрия) с Мариацеллем (федеральная земля Штирия), крупнейшим центром паломничества в стране, эксплуатируется парк подвижного состава, срок

службы части которого превышает 100 лет. Поэтому подвижной состав, не представляющий собой исторической ценности, будет заменен современными электропоездами постройки компании Stadler. Соответствующее решение принято властями земли Нижняя Австрия. Всего предстоит поставить девять трехвагонных поездов общей стоимостью 60 млн евро, в поезда будут включены вагоны первого класса с панорамными окнами. Начало поставок запланировано на декабрь 2012 г.

Федеральные железные дороги Австрии (ÖBB) передали Mariazellerbahn земле Нижняя Австрия в середине декабря 2010 г. С этого времени перевозки на этой линии выполняет компания Niederösterreichische Verkehrsorganisationsgesellschaft.