

Подвижной состав компании JR East с гибридным тяговым приводом

Японская железнодорожная компания East Japan Railway (JR East) проводит целенаправленную работу по снижению расхода энергии на тягу поездов. Одним из ее достижений в данном направлении стало создание опытных образцов подвижного состава с гибридным (комбинированным) тяговым приводом, в том числе с применением топливных элементов.

В настоящее время более 80% парка подвижного состава JR East приходится на новые, отличающиеся повышенной энергетической эффективностью электро- и дизель-поезда. Однако если учесть, что компания перевозит до 16 млн пассажиров в день, то на долю поездов JR East на дизельной тяге приходится до трети углекислого газа, выделяемого всеми железными дорогами страны. Поэтому компания разработала и в марте 2008 г. опубликовала программу перспективного развития, в которой предусмотре-

но к 2030 г. сократить эмиссию CO₂ в 2 раза по сравнению с 1990 г.

Для достижения поставленных целей необходимо в дополнение к уже реализованным мерам разработать и внедрить новые технические решения, позволяющие снизить потребление энергии. В связи с этим в 2009 г. в Центре исследований и разработок JR East была создана лаборатория инженерно-экологических исследований, которая развернула деятельность по поиску принципиально новых направлений экономии энергии.

Гибридные системы энергоснабжения

Причины интереса к гибридным системам

Со времени своего создания (1987 г.) JR East при разработке нового подвижного состава в целях замены устаревших моторвагонных поездов и снижения удельного расхода энергии на тягу руководствовалась следующими основными принципами:

- применение имеющих небольшие габариты и массу асинхронных тяговых двигателей, получающих эффективно контролируемое питание от инверторов;
- повышение эффективности рекуперативного торможения, при котором вырабатывается электроэнергия, используемая для питания других поездов;
- создание облегченных конструкций кузовов и оборудования вагонов, использование обеспечиваемых асинхронным тяговым приводом высоких показателей сцепления с целью уменьшения числа моторных вагонов в поездах и, соответственно, их массы.

Пригородный электропоезд серии 209 (рис. 1) стал первым из введенных JR East в эксплуатацию поездов, в конструкции которого были реализованы перечисленные принципы. Электропоезда всех последующих серий, поступившие в эксплуатацию на сеть пригородных линий в районе Токио, были созданы на основе именно этой серии 209. Подобным же образом было снижено удельное потребление энергии на тягу высокоскоростными электропоездами на линиях сети Синкансен: применены асинхронные тяговые электродвигатели, реализовано рекуперативное торможение, повышен коэффициент мощности, использованы облегченные кузова из алюминиевых сплавов и уменьшены их внешние габариты, улучшена с



Рис. 1. Электропоезд серии 209 компании JR East

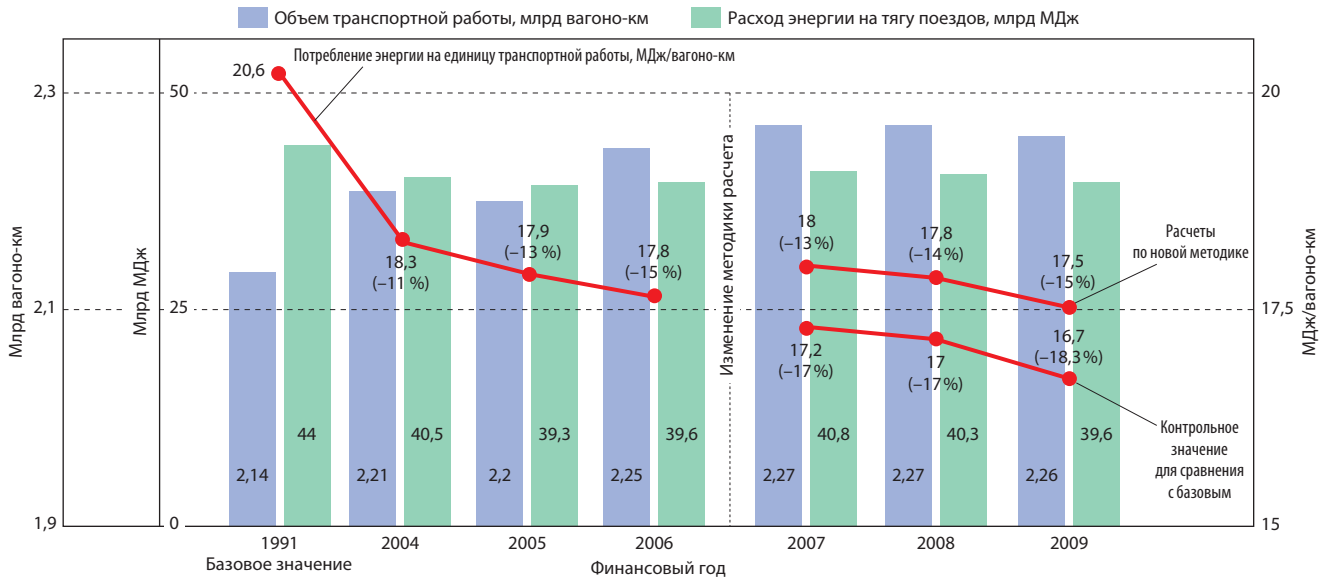


Рис. 2. Изменение общего и удельного потребления энергии на тягу поездов

точки зрения аэродинамики форма концевых вагонов с кабиной управления, что способствовало снижению аэродинамического сопротивления.

Как показано на рис. 2, JR East удалось снизить удельное потребление энергии примерно на 10%, тогда как в целом по железнодорожному транспорту страны за период с 1990 г. оно увеличилось на 5%. (В течение финансового года, закончившегося в марте 2006 г., потребление энергии рассчитывалось в соответствии с планом добровольных мер по защите окружающей среды. Начиная со следующего года была принята новая методика расчета в соответствии с законом о рациональном использовании энергии. Согласно расчетам, выполненным с применением прежней методики, потребление энергии на тягу поездов в 2009 финансовом году составило 37,8 млрд МДж, удельный расход энергии на единицу транспортной работы – 16,7 МДж/вагоно-км, что на 18,9% ниже, чем в 1991 финансовом году.)

В поездах на дизельной тяге, эксплуатируемых на неэлектрифицированных линиях, при механическом (колодочном, диско-

вом) торможении или торможении двигателем энергия рассеивается в виде тепла. В результате средний удельный расход энергии у дизель-поездов составил в 2000 г. 23 МДж/поездо-км, что существенно больше, чем у электропоездов (18,8 МДж/поездо-км).

Эффективное использование энергии при торможении является одним из действенных способов повышения топливной экономичности поездов на дизельной тяге. Для этого необходимо преобразование кинетической энергии поезда в электрическую, которую следует накопить и вновь преобразовать в кинетическую при очередном ускорении поезда. Одним из возможных путей решения этой задачи является использование на неэлектрифицированных линиях по-

ездов с электродвигателями в дополнение к дизельным. При этом возникает необходимость в накопителе электрической энергии. Основную трудность при разработке такого гибридного энергопитания представляет реализация совместного использования двух источников энергии и эффективного управления ими.

Последовательная и параллельная схемы

Возможны два варианта компоновки гибридного тягового привода (рис. 3). Параллельная схема (рис. 3, а) предусматривает механическое соединение дизельного и электрического двигателей, последовательная (рис. 3, б) – использование для питания тяговых элект-

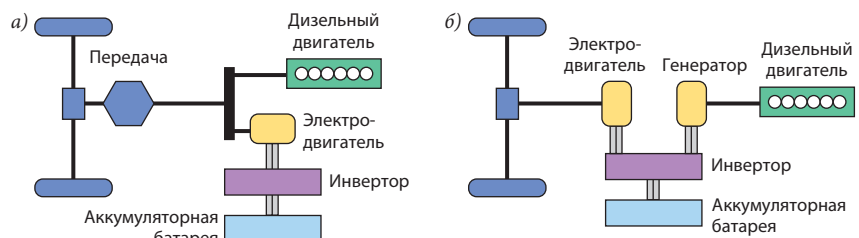


Рис. 3. Варианты компоновки гибридного тягового привода: а – параллельная схема; б – последовательная схема

ГИБРИДНЫЙ ПРИВОД

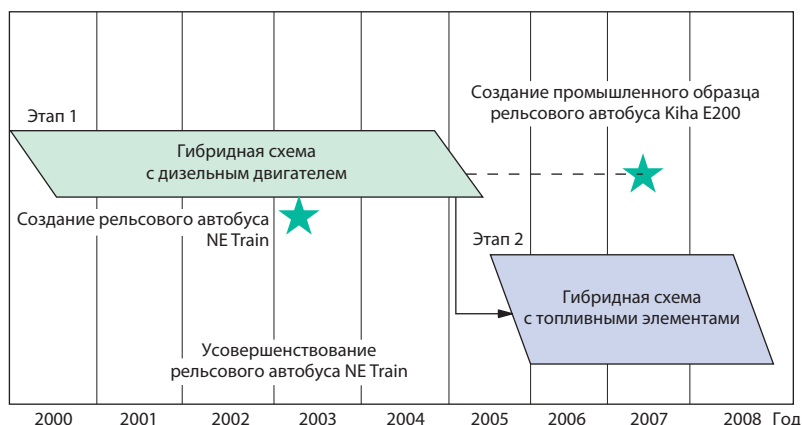


Рис. 4. Этапы разработки подвижного состава JR East с гибридным тяговым приводом

тродвигателей генератора, преобразующего механическую энергию дизельного двигателя в электрическую, и аккумуляторных батарей. Для параллельной схемы характерно большое количество элементов механического оборудования. В связи с этим капитальный ремонт таких систем весьма трудоемок, а ежедневные и ежемесячные осмотры предполагают контроль за множеством параметров. В то же время последовательная схема требует наличия преобразователя энергии, что снижает ее общую эффективность по сравнению с параллельной. Компоновка гибридного тягового привода с последовательной схемой, за исключением наличия дизель-генератора, может быть

выполнена так же, как и на обычном электропоезде. Поскольку существует возможность использования в качестве первичного источника энергии топливных элементов вместо дизеля, для дальнейшей проработки была выбрана последовательная гибридная схема.

Экспериментальный подвижной состав с гибридным энергопитанием (рис. 4)

Первоначально была разработана система гибридного энергопитания с использованием дизельного двигателя. После предварительных исследований изготовили макетный образец для проведения стендовых испытаний. Затем

было начато изготовление опытного образца вагона, получившего условное название New Energy Train (NE Train; рис. 5) и серийное KiYa E991, завершённое в апреле 2003 г. В августе 2004 г. первоначально установленную на вагоне аккумуляторную батарею заменили на новую большей емкости, после чего провели испытания, открывшие перспективу его практического использования.

В дальнейшем тяговый привод данного типа усовершенствовали в соответствии с условиями регулярной эксплуатации. Первый в мире рельсовый автобус с гибридным энергопитанием на основе дизельного двигателя, получивший обозначение Kiha E200 (рис. 6), был построен в марте 2007 г., за ним последовали еще два, и в конце июля 2007 г. они поступили в регулярную эксплуатацию на линии Коуми, проходящей в 150 км к западу от Токио.

Гибридное энергопитание с использованием топливных элементов

Затем компания JR East приступила к изучению возможности использования в качестве источника энергии для автономного подвижного состава топливных элементов.



Рис. 5. Опытный вагон NE Train с гибридным тяговым приводом



Рис. 6. Рельсовые автобусы Kiha E200 с гибридным тяговым приводом

К тому времени уже имелся определенный опыт их применения на автомобилях в качестве альтернативы двигателям на топливе, получаемом из углеводородов. JR East не занималась разработкой собственных топливных элементов, а сосредоточилась на создании подвижного состава, в тяговом приводе которого могли быть использованы уже разработанные топливные элементы, на поиске соответствующих требованиям данной области применения технических решений и урегулировании вопросов, связанных с возможным использованием водорода под высоким давлением. При этом учитывалось, что, хотя топливные элементы могут быть применены для выработки электроэнергии, их мощности недостаточно для тягового привода рельсового подвижного состава. Поскольку использование топливных элементов более эффективно при сохранении по возможности постоянства выходной мощности, была принята схема гибридного энергопитания, включающая в себя топливные элементы и аккумуляторную батарею.

Опытный образец подвижного состава с такой схемой тягового привода был создан на основе вагона NE Train с некоторыми изменениями схемы преобразователя и системы управления. Эта работа была начата в январе 2006 г., а в октябре того же года JR East приступила к ходовым испытаниям на путях завода-изготовителя первого в мире моторного вагона с гибридным тяговым приводом, в котором использованы топливные элементы; вагон получил серийное название KuMoYa E995. В течение 2007 и 2008 гг. его ходовые испытания продолжались на магистральных линиях. В дальнейшем с учетом результатов испытаний была проведена модернизация системы охлаждения, что позволило увеличить запас водорода.

Сопоставление систем гибридного тягового привода

Компоновка

Два варианта компоновки гибридного тягового привода приведены на рис. 7.

Гибридный тяговый привод с дизельным двигателем. В первом варианте (рис. 7, а) предполагается применить трехфазный асинхронный тяговый генератор с приводом от дизеля. Вырабатываемый генератором переменный ток преобразуется выпрямителем в постоянный для питания тягового электрооборудования, сюда же подключается аккумуляторная батарея. Далее постоянный ток поступает на инвертор с регулированием напряжения и частоты, от которого получают питание трехфазным переменным током асинхронные тяговые двигатели. Схема выпрямителя аналогична схеме инвертора, а режим работы подобен режиму работы инвертора при рекуперативном торможении. В данном случае использование для запуска дизеля

традиционного стартера не предусмотрено. Для этой цели вырабатываемый аккумуляторной батареей постоянный ток преобразуется инвертором в переменный трехфазный и запитывает тяговый генератор, который, работая в режиме двигателя, и запускает дизель. В качестве накопителя энергии используется ионно-литиевая аккумуляторная батарея, состоящая из четырех модулей с выходным напряжением около 170 В, так что при последовательном соединении модулей выходное напряжение батареи составляет 680 В. Первоначально были установлены пять модулей ионно-литиевых аккумуляторов, соединенных параллельно; в ходе осуществленной в 2004 г. модернизации плотность энергии каждого модуля была увеличена, что позволило сократить их число при параллельном соединении до четырех.

Гибридный тяговый привод с топливными элементами. Топливные элементы вырабатывают постоянный ток. При проведении испытаний использовались батареи топливных элементов типа HУ80,

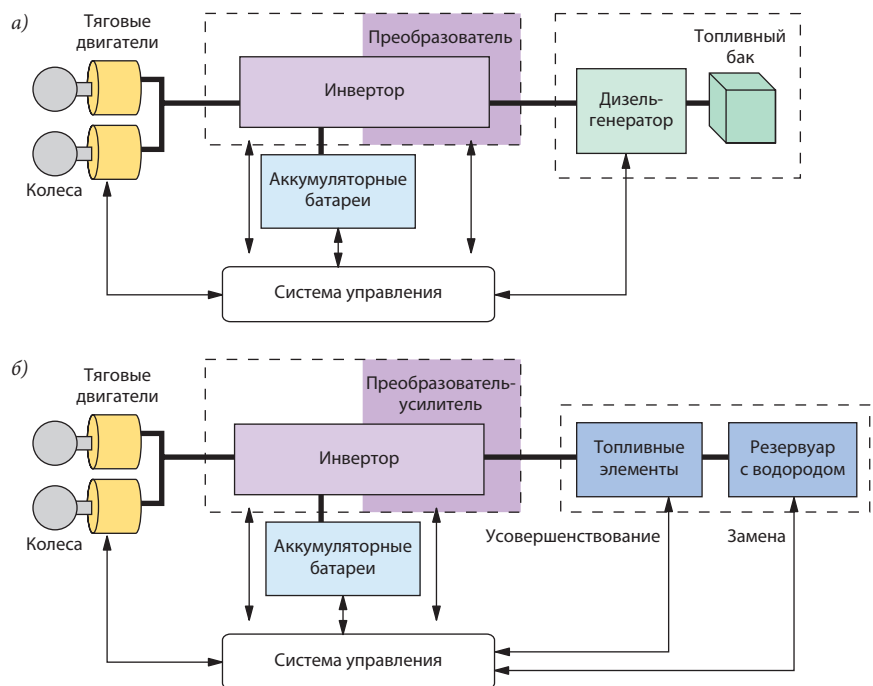


Рис. 7. Компоновка гибридного тягового привода: а — с дизельным двигателем; б — с топливными элементами

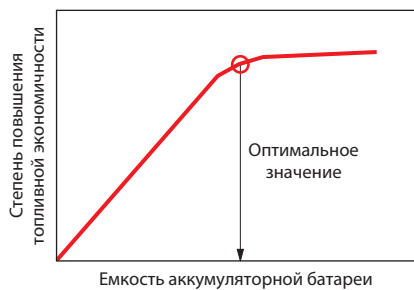


Рис. 8. Зависимость энергетической эффективности гибридного тягового привода от емкости аккумуляторной батареи

изготовленных компанией Ballard Power System (Канада). Вырабатываемое ими напряжение составляет от 250 до 450 В в зависимости от режима нагрузки. При использовании топливных элементов совместно с

аккумуляторной батареей суммарное напряжение достигает примерно 700 В. На опытном рельсовом автобусе установлены две батареи топливных элементов (рис. 7, б). Конфигурация электрической цепи на стороне преобразователя изменена, в результате чего она состоит из двух комплектов преобразователь-усилителей с двумя реакторами. Таким образом, при питании с использованием топливных элементов тяговые двигатели функционируют так же, как и при использовании дизель-генератора. В то же время поскольку в данном случае требуется большая емкость аккумуляторных батарей по сравнению со схемой с дизелем, использу-

ются пять соединенных параллельно модулей усовершенствованных ионно-литиевых батарей.

Емкость аккумуляторной батареи

Гибридный тяговый привод с дизельным двигателем. В данном случае одними из функций аккумуляторной батареи являются накопление и сохранение вырабатываемой при рекуперативном торможении энергии и питание ею вспомогательных бортовых потребителей во время стоянки и тяговых двигателей при разгоне. Поэтому, если емкость батареи недостаточна, она не может в достаточной мере аккумулировать вырабатываемую при торможении энергию, в связи с чем существенное повышение энергетической эффективности системы становится проблематичным. С другой стороны, при излишней емкости батареи эффективность системы снижается, поскольку выработка энергии при рекуперативном торможении ограничена. На рис. 8 представлена зависимость между емкостью аккумуляторной батареи и повышением энергетической эффективности системы. При достижении определенного уровня емкости батареи рост эффективности прекращается.

Другой функцией аккумуляторной батареи является дополнительное энергопитание. Хотя применение гибридного энергопитания позволяет снизить удельный расход топлива дизельным двигателем за счет его работы при наиболее экономичных частоте вращения и режиме нагрузки, его выходная мощность и потребление энергии могут стать недопустимо зависимыми от условий эксплуатации. В таких случаях аккумуляторная батарея как накопитель энергии играет регулируемую роль. Если вырабатываемой дизель-генератором электроэнергии недостаточно, дополнительно используется питание от батареи. Если же имеется

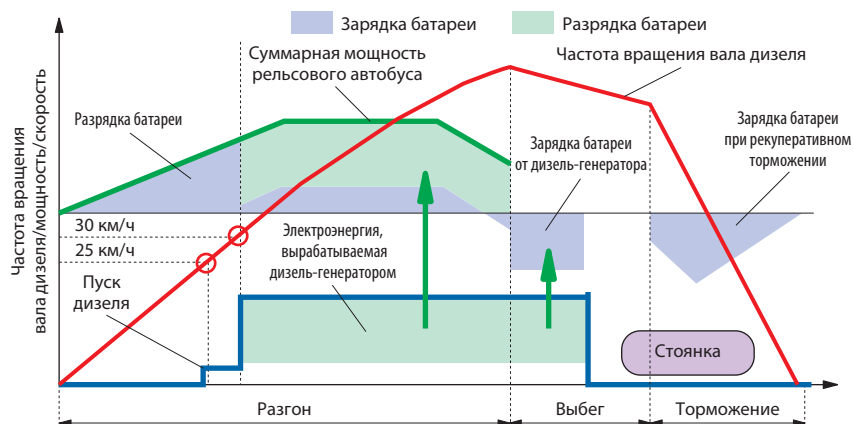


Рис. 9. Направление потоков энергии в гибридном тяговом приводе с дизельным двигателем

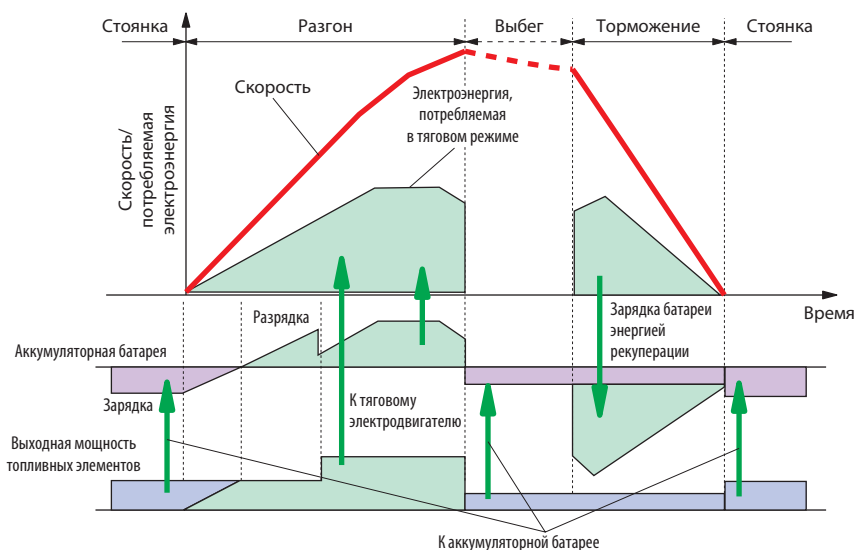


Рис. 10. Направление потоков энергии в тяговом приводе с топливными элементами

излишек вырабатываемой электроэнергии, он используется для подзарядки батареи. На рис. 9 показано направление потоков энергии в гибридном тяговом приводе с дизельным двигателем от трогания с места до остановки.

Гибридный подвижной состав с топливными элементами.

Выходная мощность каждой из двух батарей топливных элементов равна 65 кВт, суммарная – 130 кВт. Максимальная потребляемая электрическая мощность экспериментального рельсового автобуса составляет 414 кВт, т. е. имеющейся мощности топливных элементов недостаточно. Поэтому в отличие от системы гибридного энергоснабжения с дизельным двигателем система с топливными элементами при разгоне требует значительно большей дополнительной мощности аккумуляторной батареи. В то же время топливные элементы совершенно бесшумны при работе, при их использовании отсутствует проблема прекращения выработки электроэнергии во время остановок и повторного запуска при трогании с места, как при использовании дизеля. Однако поскольку мощность, каждый раз потребляемая от аккумуляторной батареи за время от трогания с места до остановки, существенно превышает аналогичный показатель при применении дизеля, аккумуляторная батарея постоянно подзарядается от топливных элементов, в том числе при движении на выбеге и остановках. Более того, в режиме рекуперативного торможения подзарядка аккумулятора от топливных элементов продолжается. На рис. 10 показано направление потоков энергии в тяговом приводе с аккумуляторной батареей и топливными элементами от трогания с места до остановки.

Управление потоками энергии

Для гибридного тягового привода (как с дизельным двигателем, так и с топливными элементами)

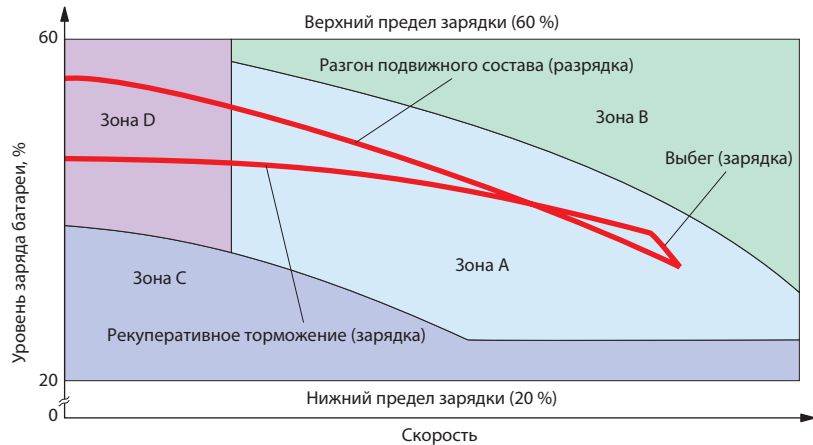


Рис. 11. Управление состоянием аккумуляторной батареи

Режимы зарядки аккумуляторной батареи транспортного средства с гибридным тяговым приводом

Зона	Режим
A	В зоне нормальной зарядки/разрядки энергия рекуперации сохраняется при движении до достижения скорости, при которой питание отключается и при выбеге происходит зарядка батареи до уровня, близкого к зоне B
B	Уровень заряда при рекуперативном торможении может превышать 60% предельного, в связи с чем подзарядка в режиме выбега не происходит (дизель работает в режиме холостого хода или останавливается; к входу в эту зону может привести применение рекуперативного торможения на уклоне)
C	При недостаточном уровне заряда батареи дизель работает с максимальной мощностью для обеспечения зарядки с возвращением в зону A
D	Дизель принудительно останавливается для снижения уровня шума

достаточно сложную задачу представляет эффективное использование энергии, вырабатываемой в режиме рекуперативного торможения. Учитывая продолжительность жизненного цикла аккумуляторных батарей, необходимо поддерживать уровень их заряда в диапазоне 20–60%. Поэтому управление зарядкой осуществляется таким образом, чтобы указанный показатель был максимальным при трогании с места. Подзарядка аккумулятора до определенного уровня напряжения происходит при выбеге и в режиме рекуперативного торможения, чтобы к моменту следующей остановки уровень заряда вновь достиг максимального значения. Этот принцип (рис. 11) реализован в обоих вариантах гибридного тягового привода. Из четырех представленных на графике зон, соответствующих раз-

личным режимам движения, система управления обеспечивает приближение состояния заряда аккумуляторной батареи к зоне A, соответствующей нормальному тяговому режиму. Если эксплуатационные условия приводят к снижению уровня заряда до уровня других зон, система управления стремится вернуть показатель в зону A (таблица).

Поскольку запас энергии, накапливаемой при рекуперативном торможении, зависит от скорости начала торможения, уровень заряда при движении в режиме выбега регулируется в соответствии со скоростью движения и состоянием аккумуляторной батареи.

H. Nomoto, Japanese Railway Engineering, 2010, № 167, p. 1–4; материалы компании JR East (www.jreast.co/jp/e).