

Энергоэффективность гибридного тягового привода

В последнее время повысился интерес к топливным элементам как к экологически чистому и высокоэффективному источнику энергии. В Японии разработан подвижной состав нового типа с использованием топливных элементов в тяговом приводе, предназначенный для замены обычных рельсовых автобусов или дизель-поездов на неэлектрифицированных участках железнодорожных линий. На опытных вагонах применен гибридный (комбинированный) тяговый привод, в котором топливные элементы сочетаются с аккумуляторными батареями. Испытания инновационного тягового привода прошли успешно.

Разработка концепции

Топливные элементы, которые вырабатывают электроэнергию и чистую воду из водорода и кислорода, содержащихся в воздухе, привлекли внимание Научно-исследовательского института железнодорожной техники Японии (RTRI) в качестве экологически чистого и высокоэффективного источника энергии для тягового привода моторвагонного подвижного состава. В результате исследований и разработок был создан блок топливных элементов мощностью более 100 кВт, чего, в принципе, достаточно для движения одиночного вагона. Проведены ходовые испытания опытного моторного вагона серии R291 (в ходе этих испытаний достигнута максимальная скорость 42 км/ч), показавшие, что этот блок устойчиво работает и при переменных нагрузках. В то же время обнаружен целый ряд ограничений для практического применения системы, заключающихся в недостаточной выходной мощности для достижения уровня ускорений обычных моторных вагонов, а также в невозможности использования энергии электродинамического торможения.

В ходе исследований были разработаны также ионно-литиевая аккумуляторная батарея, гибридный



Рис. 1. Опытная двухвагонная секция с гибридным тяговым приводом

тяговый привод в составе двух источников энергии — топливных элементов и аккумуляторной батареи — и преобразователи постоянно-постоянного тока для обоих источников энергии. Все это установили на опытный моторный вагон. В дальнейшем в целях улучшения характеристик ускорения и использования энергии торможения была переоборудована секция из двух вагонов (рис. 1), оснащенных гибридным тяговым приводом, и испытания продолжались с этой секцией.

В табл. 1 приведены основные характеристики тягового привода секции.

В табл. 2 отражены некоторые особенности первого опытного моторного вагона с питанием только от топливных элементов и двухвагонной опытной секции с гибридным тяговым приводом.

Мощностные характеристики опытной секции несколько лучше, чем двухвагонного дизель-поезда типа Kiha-40, а именно для замены таких поездов и предназначен перспективный подвижной состав.

Выбор схемы

На рис. 2 показаны разные варианты схем гибридного тягового привода с топливными элементами и аккумуляторной батареей, в табл. 3 приведено их сравнение.

Таблица 1

Основные технические характеристики тягового привода опытной секции

Параметр	Состав, значение
Питание тягового привода	Блок топливных элементов + аккумуляторная батарея; постоянный ток 1500 В
Блок топливных элементов	Типа PEFC с полимерными электродами; 120 кВт
Преобразователь	Однонаправленный ступенчатый постоянно-постоянного тока; 800–1500 В; 700 кВт
Аккумуляторная батарея	Ионно-литиевые элементы; 36 кВт·ч; 360 кВт
Преобразователь	Интерактивный постоянно-постоянного тока; 600–1500 В; 360 кВт
Тяговые двигатели	Асинхронные, 2 × 95 кВт
Резервуар с водородом	Типа III; 720 л; 35 МПа

Таблица 2

Особенности опытного вагона и опытной секции

Параметр	Опытный вагон	Опытная секция
Мощность тягового привода, кВт	120	360
Питание вспомогательных потребителей энергии	От контактной сети	От тягового привода
Возможность использования энергии торможения	Нет	Да
Энергетическая эффективность, %	~50	~65
Удельное потребление топлива (водорода), кг/км	0,14	0,2

Таблица 3

Варианты схем гибридного тягового привода

Вариант	Промежуточное напряжение постоянного тока, В	Колебания напряжения	Управление распределением мощности	Зарядка батареи от топливных элементов
A	600	Есть	Невозможно	Возможна
B	600	»	Возможно	»
C	600	»	»	»
D	1500	Нет	»	»
E	600	Есть	»	Невозможна

Так как в варианте А отсутствует устройство для управления выходной мощностью топливных элементов и аккумуляторной батареи, этот вариант в рассмотрение не принимался.

В вариантах В и С напряжение на входе тяговых инверторов зависит от состояния топливных элементов и аккумуляторной батареи, что оказывает влияние на характеристики набора скорости.

В варианте D неизбежно применение большего числа единиц оборудования, чем в других вариантах, но его достоинством является возможность адаптации к схеме обычного тягового привода.

Вариант E очень прост, но его недостатками являются невозможность использования энергии электродинамического торможения половины тяговых двигателей и зарядки аккумуляторной батареи от топливных элементов.

В результате за основу принят вариант D.

На рис. 3 показана принятая RTRI схема гибридного тягового привода на основе варианта D с включением в нее устройства управления статическим тяговым инвертором.

Аккумуляторная батарея

В качестве аккумуляторной батареи для гибридного тягового привода выбрана ионно-литиевая, которая имеет сравнительно высокие технические характеристики и надежность; к тому же в последнее время стоимость таких батарей заметно снизилась.

Батарея состоит из 336 элементов, собранных в 42 восьмиэле-

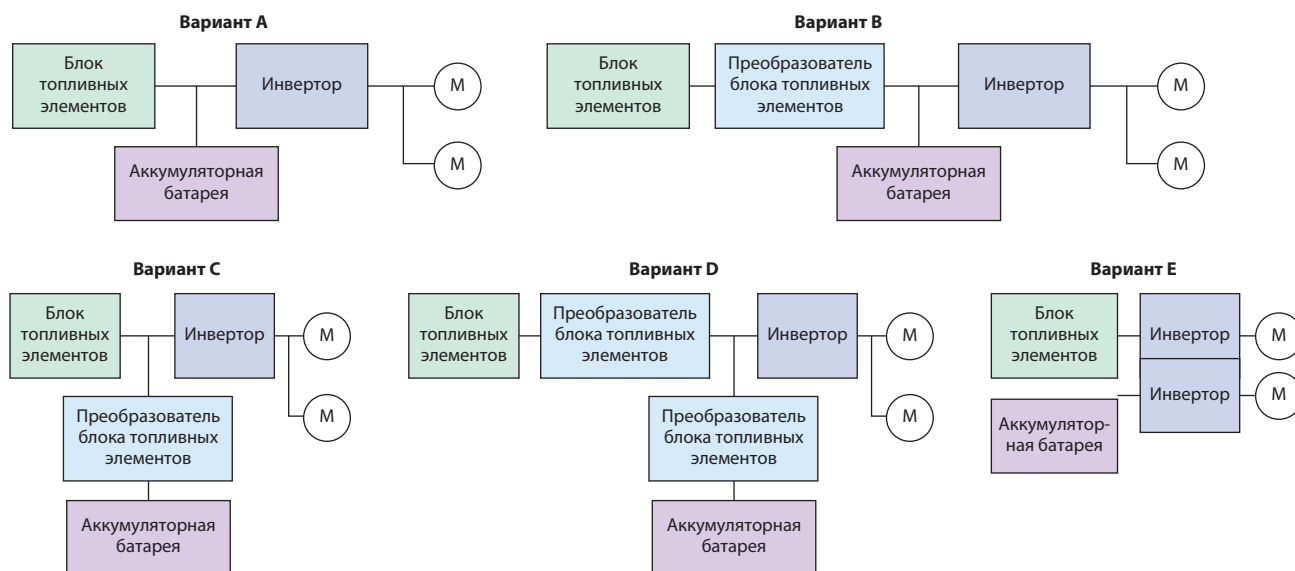


Рис. 2. Варианты схем гибридного тягового привода

ментных блока; эти блоки в свою очередь скомплектованы в две четырехблочные группы, соединенные в параллель.

Расчетное напряжение на выходе батареи равно 604,8 В, рабочее напряжение может изменяться в пределах 504–706 В. Емкость батареи составляет 60 А·ч.

Выбранная аккумуляторная батарея имеет такие же массогабаритные и мощностные характеристики, что и батарея разработанного ранее RTRI трамвайного вагона Ni-tram с гибридным тяговым приводом «контактная сеть + аккумуляторная батарея». Однако удалось усовершенствовать систему зарядки и разрядки батареи с повышенной токовой интенсивностью.

Для предотвращения перегрева батареи в легнее время разработана система воздушного охлаждения с вентиляторами, установленными в нижней части рамы батарейного модуля и управляемыми от термодатчика. Кроме того, каждый элементный блок снабжен устройством мониторинга, позволяющим машинисту располагать такой важной информацией о состоянии аккумуляторной батареи, как максимальные, минимальные и средние значения напряжения и тока в элементах, параметры зарядки (SOC), возникновение дефектов и температура в элементах.

Чтобы применить аккумуляторную батарею в гибридном тяговом приводе, разработан интерактивный преобразователь аккумуляторной батареи, который трансформирует выходное напряжение батареи 600 В постоянного тока в 1500 В также постоянного тока и наоборот. При этом за основу взят ранее разработанный стабилизатор напряжения в контактной сети. Масса преобразователя равна 2400 кг, размеры — 4500×1000×1650 мм, он установлен на полу одного из вагонов опытной секции рядом с батареей. В случае принятия результатов разработок для практического

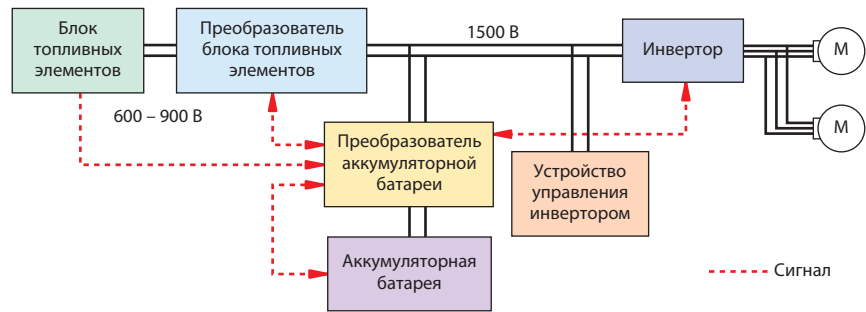


Рис. 3. Принципиальная схема гибридного тягового привода

использования есть возможность уменьшения массогабаритных параметров преобразователя. В исходном варианте исполнения система управления преобразователем помещена внутри его модуля, но в дальнейшем предусмотрено ее выделение.

Компоновка оборудования

Оборудование гибридного тягового привода размещено в обоих вагонах опытной секции. В одном вагоне установлены аккумуляторная батарея и ее преобразователь, в другом — модуль топливных элементов и его преобразователь, главный выключатель, фильтр, тяговые инверторы и система охлаждения. Под кузовом этого вагона подвешен резервуар с водородом под высоким давлением. Ввиду экспериментального назначения оборудования оптимизация его массогабаритных параметров не осуществлялась.

Система контроля

Для контроля состояния и функционирования оборудования гибридного тягового привода и регистрации результатов соответствующих измерений RTRI разработал специальную систему Hybrid-monitor.

На экраны монитора выводятся значения фактической скорости движения опытной секции, выходного напряжения модулей топливных элементов и аккумуляторной

батареи, напряжения и тока в тяговом инверторе, параметров режима зарядки (разрядки) аккумуляторной батареи и температуры ее элементов.

Система управления

Работа преобразователя аккумуляторной батареи

Преобразователь аккумуляторной батареи управляет мощностью на выходе преобразователя блока топливных элементов и осуществляет зарядку или разрядку аккумуляторной батареи, получая сигналы от монитора Hybrid-monitor, тягового инвертора, устройства управления и преобразователя блока топливных элементов. Контрольные действия в отношении аккумуляторной батареи заключаются в поддержании постоянного напряжения в шине, соединяющей преобразователя блока топливных элементов и аккумуляторной батареи, инвертор и устройство управления. Если напряжение в шине превышает 1500 В, преобразователь аккумуляторной батареи переводит батарею в режим зарядки, если это напряжение ниже 1500 В — в режим разрядки.

Для этих режимов заранее определены пороговые значения — SOC CEO для зарядки аккумуляторной батареи и SOC CSO для ее разрядки, и преобразователь аккумуляторной батареи контролирует выход преобразователя блока топливных элементов для поддержания

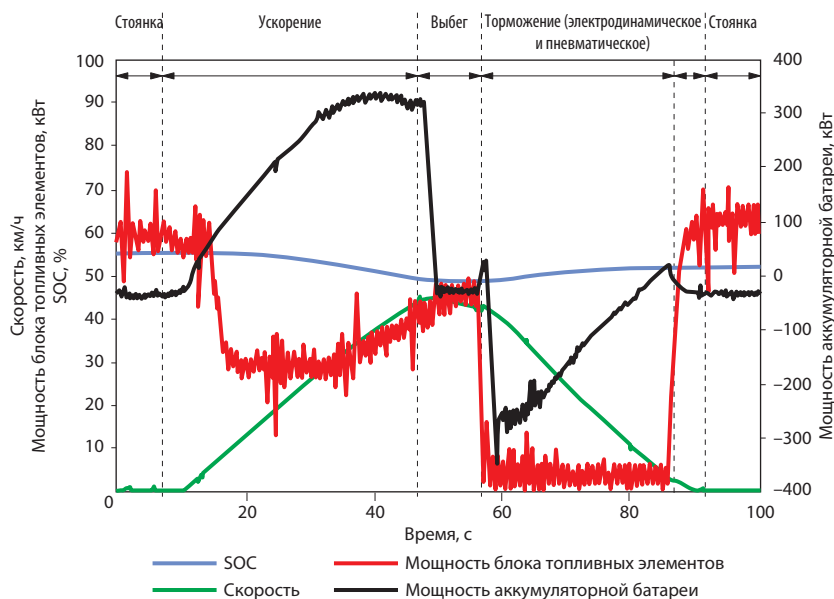


Рис. 4. Фрагмент записи результатов испытаний опытной секции

сигнала SOC в пределах между пороговыми величинами. Когда скорость движения опытной секции превышает 5 км/ч, преобразователь аккумуляторной батареи снижает величины CEO и CSO для обеспечения получения энергии электродинамического торможения в зависимости от скорости движения. Соответственно, величина SOC ниже на стоянке (или при скорости движения менее 5 км/ч). При ходовых испытаниях опытной секции в условиях высоких значений SOC энергию для ускорения она может получать только от аккумуляторной батареи.

С целью максимального использования энергии торможения была установлена величина CEO, равная 70%. Во избежание возникновения резонанса из-за колебаний сигнала SOC величину CSO установили равной 60%, т. е. на 10% меньше величины CEO. Была подтверждена возможность в ходе испытаний развить максимальную скорость 45 км/ч при 30%-ной зарядке аккумуляторной батареи. Параметры преобразователя аккумуляторной батареи в дальнейшем могут быть изменены.

Работа тягового инвертора

Для управления гибридным тяговым приводом в экстренных ситуациях требуется многофункциональный инвертор. В этих целях инвертору были добавлены следующие функции:

- если получен сигнал «Аккумуляторная батарея перезаряжена», инвертор прекращает прием энергии электродинамического торможения;
- если получен сигнал «Аккумуляторная батарея разряжена», режим работы инвертора снижается на две ступени и энергия поступает только от топливных элементов;
- если напряжение на входе инвертора снижается, он уменьшает свою выходную мощность с целью поддержания напряжения постоянного тока на уровне около 1500 В.

Работа системы управления

На рис. 4 показан пример записи результатов ходовых испытаний опытной секции с использованием приведенной выше системы управления гибридным тяговым приводом.

Здесь преобразователь блока топливных элементов выполнял следующие операции.

Во-первых, во время стоянок он увеличивал величину SOC до более чем 60%. Во-вторых, он снижал выходную мощность в соответствии со скоростью движения и уменьшал величину SOC для восприятия энергии при наборе скорости. В-третьих, он распределял мощность в соответствии с разницей между фактической и заданной пороговой величинами SOC в зависимости от скорости секции на выбеге. В-четвертых, он снижал выходную мощность до минимальной величины и управлял зарядкой аккумуляторной батареи, когда секция находилась в режиме электродинамического торможения. Наконец, он регулировал выходную мощность для поддержания величины SOC на первоначальном уровне (выше 60%).

Оценка энергоэффективности гибридного тягового привода

Методика испытаний и интерпретация результатов

При оценке энергоэффективности гибридного тягового привода необходимо иметь в виду, что ходовые испытания опытной секции проводились в специфических условиях. Так как длина испытательного пути составляла всего 615 м, режим выбега, как на магистральных линиях, поддерживаться не мог, соответственно, испытания проводились в режиме вперед — назад. Более того, проследование экспериментального участка занимало чуть больше 1 мин. Из-за этого для накопления представительного пробега требовалось много времени, а дополнительный расход энергии увеличивался. Естественно, по указанным причинам средняя скорость движения опытной секции (с учетом длительности стоянок) и общий КПД были ниже, чем если бы испытания проводились на

магистральных линиях, и разброс результатов измерений оказался довольно широким.

Поэтому были сопоставлены результаты испытаний для случаев с ожиданием восстановления величины SOC и без этого ожидания, а также при включенной и выключенной установке для кондиционирования воздуха.

При оценке различных аспектов энергоэффективности применялись следующие соотношения:

- эффективность использования топлива (водорода) — отношение пройденного расстояния, км, к количеству израсходованного водорода, кг;
- нетто-эффективность топливных элементов — отношение потребленной энергии, кВт·ч, к энергии израсходованного водорода, кВт·ч;
- эффективность использования энергии электродинамического торможения — отношение генерированной энергии торможения, кВт·ч, к энергии, затраченной на ускорение, кВт·ч;
- энергоэффективность опытной секции — отношение суммы величин энергии, затраченной на ускорение, дополнительно израсходованной и выделенной при разрядке аккумуляторной батареи, кВт·ч, к энергии израсходованного водорода, кВт·ч, которая рассчитывалась исходя из его теплотворной способности (237 кДж/моль).

Испытания при отключенной установке кондиционирования воздуха

На рис. 5 и 6 показаны результаты последовательных испытательных рейсов с поддержанием и без поддержания величины SOC (соответственно в ситуациях 1 и 2).

В ситуации 1 ходовые испытания можно было продолжать до тех пор, пока не кончится топливо. В данной ситуации эффективность использования топлива (водорода)

и других аспектов энергоэффективности оценивали по результатам 30 последовательных испытательных рейсов, во время которых величина SOC удерживалась на уровне 60%.

В ситуации 2 без поддержания величины SOC постепенно уменьшалась по ходу испытаний, которые завершались, когда эта величина опускалась ниже 30%. В данной ситуации были выполнены 22 испытательных рейса.

Испытания при включенной установке кондиционирования воздуха

На рис. 7 показаны результаты последовательных испытательных рейсов без поддержания величины SOC и с включенной установкой кондиционирования воздуха только в одном вагоне (ситуация 3). В данной ситуации были выполнены 16 испытательных рейсов со снижением величины SOC с 60 до 30%.

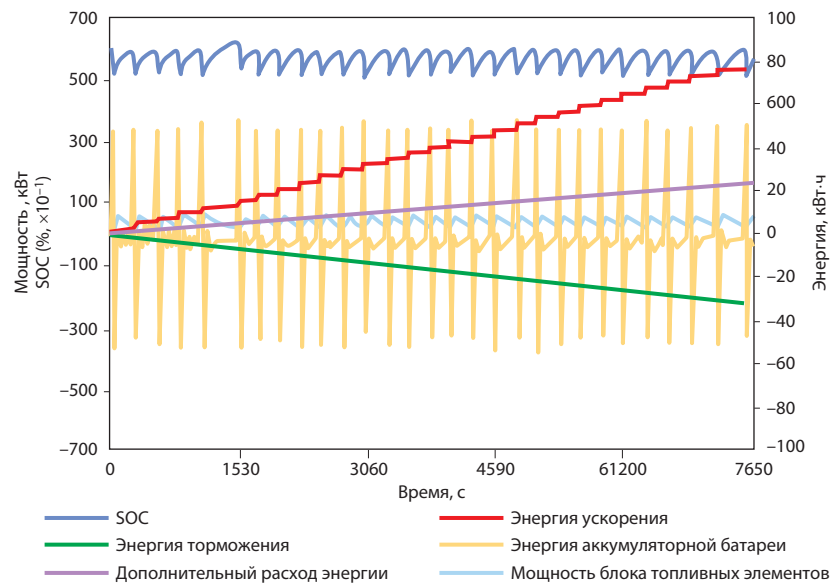


Рис. 5. Результаты испытаний опытной секции в ситуации 1

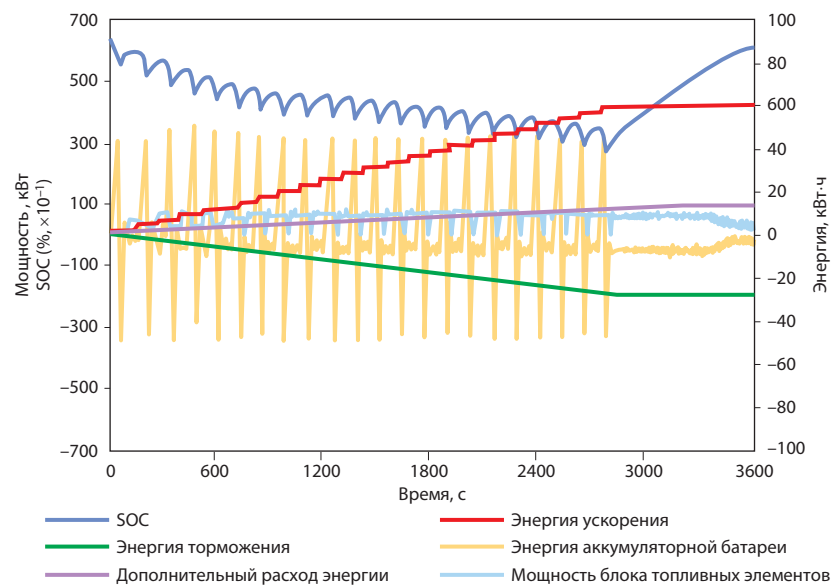


Рис. 6. Результаты испытаний опытной секции в ситуации 2

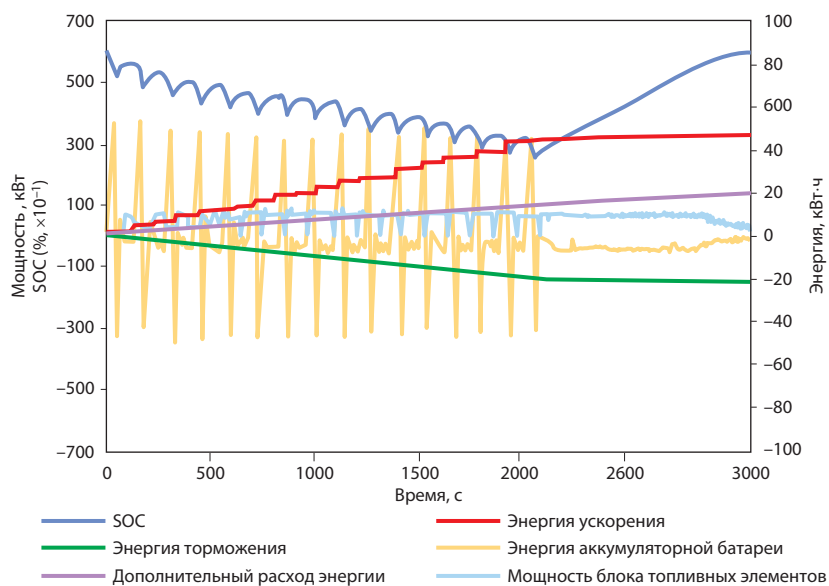


Рис. 7. Результаты испытаний опытной секции в ситуации 3

Выводы

Результаты ходовых испытаний в различных ситуациях обобщены в табл. 4, 5 и 6. Видно, что энергоэффективность опытной секции с гибридным тяговым приводом наиболее высока в ситуации 2 (наименьший дополнительный расход энергии по сравнению с другими ситуациями). Во всех ситуациях эффективность топливных элементов близка к 50%. В ситуациях 2 и 3, отличие между которыми заключается только во включении или отключении установки кондиционирования воздуха, отмечена разница в 1,07 км/кг в эффективности использования топлива и в 7,4% в эффективности опытной секции. В ситуации 2 для восстановления величины SOC с 30 до 60% требовалось 12 мин, в ситуации 3 – около 15 мин, в ситуации 1 – около 3 мин. Резервуар высокого давления имеет вместимость 17 кг (по водороду), чего хватает на пробег опытной секции 55–75 км без дозаправки.

Заключение

RTRI провел ходовые испытания опытной двухвагонной секции, оснащенной гибридным (топливные элементы + аккумуляторная батарея) тяговым приводом, и оценил ее энергоэффективность в разных ситуациях. Подтверждена работоспособность привода и его высокая эффективность (не менее 65%). Эти показатели могут быть еще лучше при эксплуатации на магистральных линиях. В дальнейшем RTRI планирует работы по оптимизации массы и размеров оборудования, с тем чтобы его можно было разместить под кузовами вагонов, а также по увеличению срока службы топливных элементов.

T. Yamamoto et al. Quarterly Report of RTRI, 2010, № 3, p. 115–121; материалы 6-й конференции Hydrail, 1–2 июля 2010 г., Стамбул, Турция (www.hydrail.org).

Таблица 4

Эффективность использования топлива

Ситуация	Работа кондиционера	Поддержание величины SOC	Пробег, км	Расход водорода, кг	Эффективность использования топлива, км/кг
1	Нет	Да	17,9	5,04	3,55
2	»	Нет	13,4	3,08	4,34
3	Да	»	9,7	2,97	3,27

Таблица 5

Разные аспекты получения и расхода энергии, кВт·ч

Ситуация	Энергия на ускорение	Дополнительный расход энергии	Использованная энергия торможения	Энергия разрядки батареи	Энергия израсходованного водорода
1	82,4	25,9	33,3	1,7	164,7
2	60,8	14,5	28,4	0	100,6
3	46,2	19,3	21,6	0	97,1

Таблица 6

Энергоэффективность гибридного тягового привода, %

Ситуация	Эффективность топливных элементов	Эффективность использования энергии торможения	Эффективность опытной секции
1	49,8	40,4	64,7
2	50,5	46,7	74,8
3	49,8	46,7	67,4