

В.И. Омеляненко, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова, Г.В. Омеляненко

ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА ОСНОВЕ БАТАРЕИ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И БОРТОВОГО ИНЕРЦИОННОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МОТОР-ВАГОННОГО ПОЕЗДА

В роботі розглянуто тяговий електропривод на основі паливних елементів та інерційного накопичувача енергії для мотор-вагонного рухомого складу. Запропоновано принцип керування потоками потужності у тяговому електроприводі у режимах розгону та гальмування рухомого складу. Розроблено математичну модель тягового електропривода у вигляді сукупності трьох складових: поїзда, тягового блока і батареї паливних елементів. За допомогою неї досліджено роботу запропонованого тягового електропривода при вирішенні тестової тягової задачі для рухомого складу. Встановлено, що застосування інерційного накопичувача енергії зменшує витрати водню не менш ніж на 25 %, що забезпечує збільшення пробігу рухомого складу між екіпуванням понад 30 %. Бібл. 16, табл. 4, рис. 6.

Ключові слова: тяговий електропривод, паливний елемент, інерційний накопичувач, мотор-вагонний рухомий склад.

В работе рассмотрены тяговый электропривод на основе топливных элементов и инерционного накопителя энергии для мотор-вагонного подвижного состава. Предложен принцип управления потоками мощности в тяговом электроприводе в режимах разгона и торможения подвижного состава. Разработана математическая модель тягового электропривода в виде совокупности трех составляющих: поезда, тягового блока и батареи топливных элементов. С помощью нее исследована работа предложенного тягового электропривода при решении тестовой тяговой задачи для подвижного состава. Установлено, что при применении инерционного накопителя энергии уменьшается расход водорода не менее чем на 25 %, что обеспечивает увеличение пробега подвижного состава между экипуваннями более чем на 30 %. Библ. 16, табл. 4, рис. 6.

Ключевые слова: тяговый электропривод, топливный элемент, инерционный накопитель, мотор-вагонный подвижной состав.

Введение. Топливные элементы в качестве основы эффективных и экологически чистых систем электропитания в настоящее время вызывают интерес в плане их применения на подвижном составе путем замены на не электрифицированных линиях железных дорог обычных дизельных поездов на мотор-вагонные «водородные» поезда [1, 2]. К сегодняшнему дню несколько мировых производителей создали подвижной состав с применением топливных элементов [3]. Впервые топливные элементы на подвижном составе были применены на опытных поездах компании JR East и исследовательского центра RTRI в Японии. В США на маневровом тепловозе компании BNSF были установлены топливные элементы для проведения исследований и опытной эксплуатации. После всеобъемлющих испытаний «водородных» поездов iLINT (разработчик – Alstom) и Mireo Plus H (разработчик – Siemens) эти компании заключили контракты на коммерческую поставку поездов с топливными элементами. Испанские компании CAF и Talgo планируют модернизацию и создание мотор-вагонных поездов с применением топливных элементов. Однако применение топливных элементов на подвижном составе имеет ряд особенностей вследствие специфики работы тягового электропривода, характеризующейся широким диапазоном изменения нагрузок и частоты вращения.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Неотъемлемой частью энергетической установки на топливных элементах является накопитель энергии, применение которого повышает эффективность использования топливных ячеек на подвижном составе. В существующих проектах в качестве накопителей энергии рассматриваются только литий-ионные батареи [3-5]. Вне поля зрения для таких поездов пока остаются инерционные накопители энергии [5]. Однако, несмотря на успехи в развитии элект-

рохимических накопителей, считаем целесообразным изучение и исследование всех доступных технических решений для накопителей энергии, применение которых способствует повышению энергоэффективности подвижного состава.

Анализ [6-9] показал, что удельные весовые энергетические показатели конденсаторных, электрохимических и инерционных накопителей имеют практически один порядок 0,02-0,08 МДж/кг. Что касается удельных объемных энергетических показателей, то здесь инерционные превосходят другие типы [6]: 25,7-151 МДж/м³ у инерционных и 0,6-17,3 МДж/м³ у других типов. Такая же картина наблюдается и с весовыми, а также объемными удельными показателями мощности: 1,29-2,5 кВт/кг и 536-4273 кВт/м³ у инерционных, а также 0,16-0,26 кВт/кг и 54-173 кВт/м³ у других типов. Поэтому можно сказать, что инерционные накопители энергии существенным образом по своим удельным энергетическим и мощностным показателям превосходят конденсаторные и электрохимические накопители. Но, в отличие от электрохимических накопителей, которые широко применяются на различных транспортных средствах и особенности применения которых в тяговых электроприводах изучены достаточно хорошо, применение инерционных накопителей на транспортных средствах имеет ограниченный характер [9-13].

Целью работы является исследование возможности и особенностей применения инерционных накопителей в тяговом электроприводе мотор-вагонных поездов с силовой энергетической установкой на основе топливных элементов.

Для достижения этой цели решались две задачи. Первая состоит в создании общей математической модели тягового электропривода регионального

© В.И. Омеляненко, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова, Г.В. Омеляненко

мотор-вагонного поезда с автономным источником электроэнергии на базе батареи топливных элементов и бортового инерционного накопителя энергии, которая связывала бы основные параметры компонент энергетической установки с рабочими свойствами этого привода и адекватно отражала все режимы его работы. Вторая заключается в апробации созданной модели на примере концептуального проекта регионального поезда, перемещающегося по конкретному не электрифицированному участку железной дороги.

1. Схема тягового электропривода и перетоки мощности. Схема тягового электропривода, представленная на рис. 1, включает следующие компоненты: источник электрической энергии, накопитель и

исполнительный механизм. Источник электрической энергии представлен водородной накопительной системой (HFT), батареей топливных элементов (FC) и преобразователем P_DC-DC. Накопитель представлен инерционным аккумулятором энергии FESS и преобразователем S_DC-DC. Исполнительный механизм (DM) состоит из тягового асинхронного двигателя (IM), редуктора (G) и механизма «колесо-рельс» (W-R). Выход преобразователя P_DC-DC и вход автономного инвертора напряжения (TI) соединены шиной звена постоянного тока, к которой через соответствующие полупроводниковые преобразователи параллельно подключены FESS, система питания собственных нужд (AS), а также блок тормозных резисторов (BR).

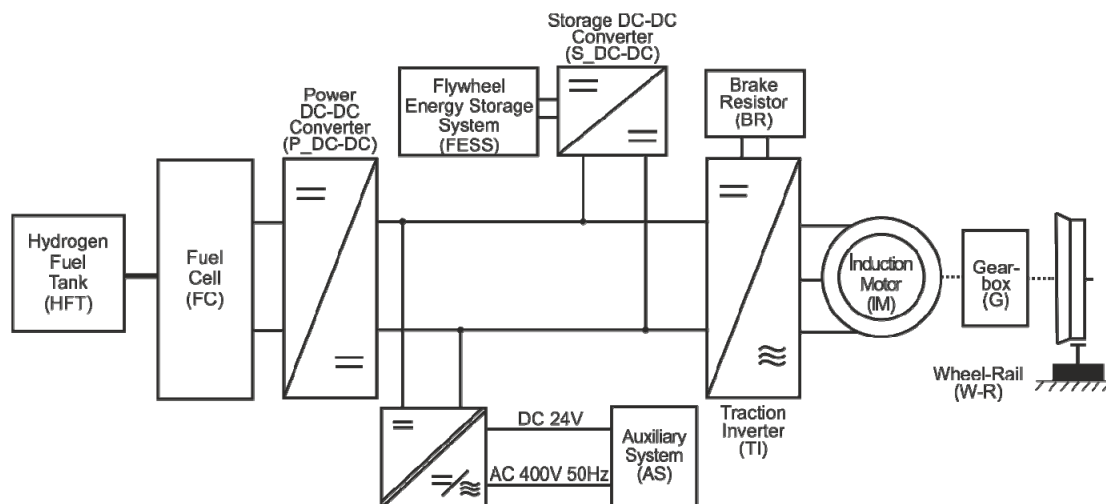


Рис. 1. Блок-схема тягового электропривода:

HFT – водородная накопительная система; FC – батарея топливных элементов; P_DC-DC – преобразователь постоянного напряжения батареи топливных элементов; FESS – накопитель энергии; S_DC-DC – преобразователь постоянного напряжения накопителя; AS – система питания собственных нужд; BR – блок тормозных резисторов; TI – автономный инвертор напряжения; IM – тяговый асинхронный двигатель; G – редуктор; W-R – механизм «колесо-рельс»

Расчетные схемы потоков мощности между основными узлами схемы тягового электропривода для различных режимов работы подвижного состава определены нами, исходя из следующих допущений.

Номинальная электрическая мощность батареи топливных элементов P_{fc} определяется исходя из требования обеспечить режим движения с максимальной допустимой скоростью, а также работу устройств собственных нужд P_{as} . То есть, должно выполняться условие

$$P_{fc} = P_p + P_{as}, \quad (1)$$

где P_p – мощность, поступающая на тяговый блок.

При этом мощность, потребляемая устройствами собственных нужд, при любых режимах движения подвижного состава принимается величиной постоянной $P_{as} = \text{const}$.

Величина энергоемкости и мощности накопителя приняты такими, что в состоянии обеспечить совместно с FC требуемые режимы ускорения и торможения подвижного состава. Поэтому звено тормозного резистора BR может быть исключено из рассмотрения.

Схемы перетоков мощности в режимах торможения и ускорения подвижного состава представлена на рис. 2. Очевидно, что для принятой схемы тягового электропривода потоки мощности определяются зна-

чениями токов в соответствующих ветвях. Процессы будем рассматривать с позиции работы накопителя.

Режим торможения.

Ток I_{ch} , потребляемый накопителем в этом режиме работы, в соответствии с 1-м законом Кирхгофа

$$I_{ch} = I_{inv} - I_{as} + I_{dc}. \quad (2)$$

Ток I_{inv} , обусловленный работой IM в режиме генератора:

$$I_{inv} = \frac{P_{wr}}{U_{dc}} \eta_{\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{U_{dc}} U_m I_m \eta_{inv} \cos \varphi_m, \quad (3)$$

где $\eta_{\Sigma} = \eta_g \eta_m \eta_{inv}$ – суммарный к.п.д. звена DM тягового блока; $\cos \varphi_m$ – коэффициент мощности IM; η_g , η_m , η_{inv} – к.п.д. редуктора, IM и TI, соответственно.

Ток, потребляемый устройствами собственных нужд:

$$I_{as} = P_{as} / U_{dc}. \quad (4)$$

Ток, отдаваемый FC:

$$I_{dc} = \frac{U_{fc} \eta_{fc}}{U_{dc}} I_{fc}, \quad (5)$$

где η_{fc} – к.п.д. FC.

В итоге, мощность, потребляемая накопителем, подается в систему электромеханического преобразования энергии (SEMEC) накопителя током

$$I_{ch} = \frac{\sqrt{3}}{U_{dc}} U_m I_m \eta_{inv} \cos \varphi_m - \frac{P_{as}}{U_{dc}} + \frac{U_{fc} \eta_{fc}}{U_{dc}} I_{fc}. \quad (6)$$

Исходя из баланса мощности для накопителя

$$U_{dc} I_{ch} \eta_{s_dc} = U_s I_s, \quad (7)$$

где η_{s_dc} – к.п.д. P_DC-DC, а ток, потребляемый SEMEC накопителя, равен

$$I_s = \frac{U_{dc} I_{ch} \eta_{s_dc}}{U_s}. \quad (8)$$

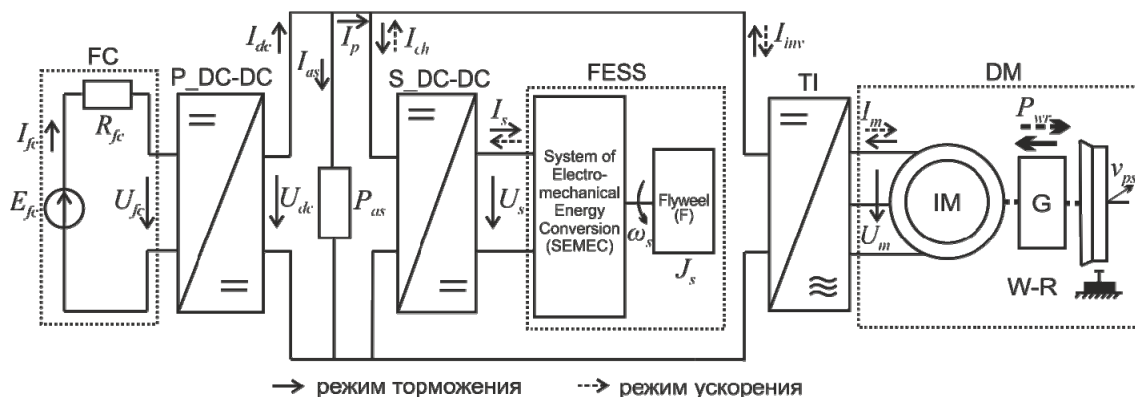


Рис. 2. Расчетная схема режима торможения и ускорения:

I_{fc} – ток FC; I_{dc} – ток на выходе P_DC-DC; I_p – ток, поступающий на тяговый блок; I_{as} – ток собственных нужд; I_{ch} – ток на входе в S_DC-DC; I_s – ток FESS; I_{inv} – ток TI; I_m – ток IM; U_{fc} , U_{dc} , U_s , U_m – напряжения FC, звена постоянного тока, SEMEC и IM, соответственно; E_{fc} – электродвижущая сила (ЭДС) FC; R_{fc} – активное сопротивление FC; P_{wr} – мощность на ободе колес; ω_s , J_s – частота вращения и момент инерции маховика F; v_{ps} – скорость движения поезда

В итоге, получаем аккумулирование накопителем энергии в процессе торможения подвижного состава в виде приращения частоты вращения его маховика

$$\frac{d\omega_s}{dt} = \frac{U_s I_s \eta_s}{J_s \omega_s}, \quad (9)$$

где η_s – к.п.д. FESS.

Режим ускорения.

Здесь IM потребляет электроэнергию, вырабатываемую FC за вычетом энергии, идущей на собственные нужды, а также энергию, запасенную накопителем.

В этом режиме ток, отдаваемый накопителем, в соответствии с 1-м законом Кирхгофа определится как

$$I_{ch} = I_{inv} + I_{as} - I_{dc}. \quad (10)$$

Ток, потребляемый автономным инвертором для тяги

$$I_{inv} = \frac{P_{wr}}{U_{dc} \eta_{\Sigma}} = \frac{\sqrt{3}}{U_{dc} \eta_{inv}} U_m I_m \cos \varphi_m. \quad (11)$$

При условии, что выражения для тока, потребляемого устройствами собственных нужд и генерируемого FC остаются прежними – (4) и (5), соответственно, мощность, генерируемая SEMEC накопителя, подается в звено постоянного тока током

$$I_{ch} = \frac{\sqrt{3}}{U_{dc} \eta_{inv}} U_m I_m \cos \varphi_m + \frac{P_{as}}{U_{dc}} - \frac{U_{fc} \eta_{fc}}{U_{dc}} I_{fc}. \quad (12)$$

Из баланса мощности для SEMEC накопителя в этом режиме

$$U_{dc} I_{ch} = U_s I_s \eta_{s_dc} \quad (13)$$

получаем ток, отдаваемый SEMEC накопителя, в таком виде

$$I_s = \frac{U_{dc}}{U_s \eta_{s_dc}} I_{ch}. \quad (14)$$

Механическая мощность, затрачиваемая на ускорение поезда, отбираемая от маховика накопителя, через SEMEC поступает в S_DC-DC

$$N = J_s \omega_s \frac{d\omega_s}{dt} \eta_s = U_s I_s. \quad (15)$$

В итоге, в процессе разгона получаем убыль запасенной маховиком энергии за счет снижения частоты его вращения

$$\frac{d\omega_s}{dt} = \frac{U_s I_s}{J_s \omega_s \eta_s}. \quad (16)$$

Таким образом, из приведенных выше соотношений очевидно, что при требуемой мощности на ободах колес P_{wr} и имеющейся мощности FC P_{fc} наличие в схеме тягового электропривода накопителя энергии позволяет организовывать перетоки мощности между его компонентами в любых режимах работы подвижного состава (по аналогии с рассмотренными выше также и в режимах движения с постоянной скоростью, выбега и стоянки). В качестве регулятора этих потоков выступают соотношения напряжений на входах и выходах силовых частей схем полупроводниковых преобразователей (P_DC-DC, S_DC-DC, TI), через которые FC, FESS и DM подключены к шине звена постоянного тока.

2. Математическая модель тягового привода.

Математическую модель рассматриваемого тягового привода представим в виде совокупности трех составляющих: поезда, тягового блока и батареи топливных элементов.

Математическая модель поезда.

Сила тяги или торможения подвижного состава $\pm F_t$ во всем диапазоне скоростей определяется мощностью на ободе колес $P_{wr} = \pm F_t v_{ps}$, которая обусловлена суммарной мощностью тяговых двигателей на осях колесных пар, оснащенных двигателями.

Если предположить, что поезд массой m_{ps} , сосредоточенной в одной точке, движется по пути длиной s в момент времени t со скоростью v_{ps} , имеет ускорение dv_{ps}/dt , испытывает силу сопротивления движению F_{rr} , гравитационную силу от уклона пути F_g , а также силу

сопротивления от движения в кривых F_c и при этом тяговыми двигателями обеспечивается сила тяги или торможения F_b , то связь пройденного поездом пути и скорости со временем, а также с действующими на него силами представляется в виде системы

$$\begin{cases} \frac{dv_{ps}}{dt} = \frac{\pm F_t - F_{rr} \pm F_g - F_c}{(1 + \varepsilon)m_{ps}}; \\ \frac{ds}{dt} = v_{ps}. \end{cases} \quad (17)$$

где $(1 + \varepsilon)$ – коэффициент вращающихся масс поезда.

Сопротивление движению, обусловленное трением качения колес по рельсам и аэродинамикой поезда, определяется с помощью формулы Дэвиса

$$F_{rr} = A_{rr} + B_{rr}v_{ps} + C_{rr}v_{ps}^2, \quad (18)$$

где A_{rr}, B_{rr}, C_{rr} – постоянные коэффициенты, зависящие от конфигурации поезда.

Эти коэффициенты обусловлены следующим: A_{rr} – трением качения колес по рельсам и трением осей колесных пар; B_{rr} – трением гребней колес о боковые поверхности головки рельса; C_{rr} – аэродинамикой поезда.

Гравитационная сила от уклона вычисляется с помощью равенства:

$$F_g = 0,001m_{ps}gi, \quad (19)$$

где g – ускорение свободного падения; i – уклон пути.

Сила сопротивления от движения в кривых для поездов рассматриваемого класса определяется с помощью выражения

$$F_c = \frac{0,006867}{R}m_{ps}, \quad (20)$$

где R – радиус кривой.

Таким образом, приведенная модель показывает, что при заданных параметрах пути и ограничениях по скорости движения подвижного состава на его участках, кривые движения определяются мощностью на ободе колес P_{wr} . Варьируя P_{wr} посредством изменения составляющих ее компонент, возможно регулировать требуемую силу тяги и скорость движения подвижного состава.

Математическая модель тягового блока.

Тяговым блоком обозначим часть схемы тягового электропривода, включающей FESS и DM, которые через преобразователи S_DC-DC и TI, соответственно, питаются так называемым тяговым током I_p , что образуется током FC I_{dc} за вычетом тока потребителей собственных нужд I_{as}

$$I_p = \frac{U_{fc}I_{fc}\eta_{p_dc}}{U_{cd}} - I_{as}, \quad (21)$$

где η_{p_dc} – к.п.д. P_DC-DC.

На данном этапе исследований этот ток будем считать заданным и неизменным. Такое допущение предполагает обмен энергией только внутри тягового блока, то есть между исполнительным механизмом DM и накопителем FESS, и работу преобразователя P_DC-DC в статическом режиме с конкретным коэффициентом преобразования.

Центральным звеном тягового блока является инерционный накопитель энергии. FESS представляет

собой сочетание кольцевого цилиндрического маховика (аккумулятора) и системы электромеханического преобразователя энергии SEMEC в виде обращенной машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводниковым коммутатором [12, 13].

Схема SEMEC приведена на рис. 3. Здесь мы имеем дело с двухполюсной четырехфазной машиной, каждая фаза которой содержит по одной катушке, смещенной по окружности якоря на угол, пропорциональный τ/N_f , где N_f – число фаз, а τ – полное деление.

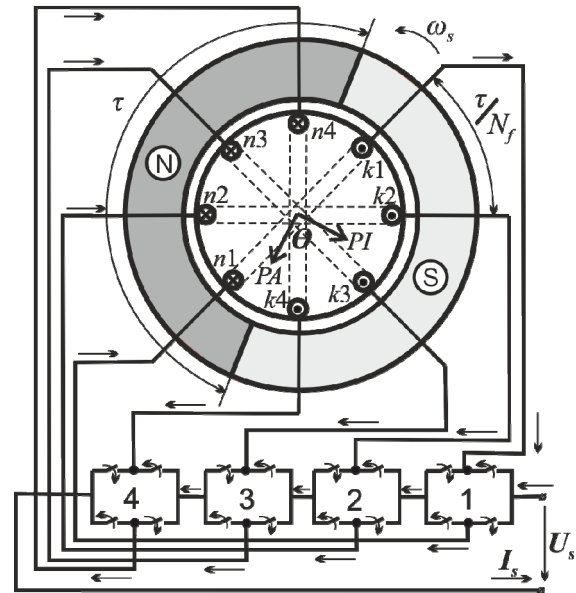


Рис. 3. Система электромеханического преобразования энергии накопителя:

θ – угол нагрузки между осью магнитного поля индуктора PI и тока якоря PA ; $n1 \dots n4, k1 \dots k4$ – начала и концы катушек обмотки, соответственно; $1 \dots 4$ – коммутаторы

Математические модели работы тягового блока в режимах ускорения и торможения представлены в табл. 1.

Как следует из формулы для ЭДС SEMEC накопителя (табл. 1), в рассматриваемой системе имеется возможность регулировать величину электродвижущей силы по двум каналам – числом фаз обмотки якоря и углом нагрузки, изменяя алгоритм коммутации полупроводниковых ключей. Таким образом, при обмене энергией накопителя и звена электромеханического преобразования энергии можно в широких пределах влиять как на мощность процесса, так и на ее составляющие.

Смысл символов в приведенных в табл. 1 выражениях следующий: η_s, e_s, L_s, R_s – к.п.д., ЭДС, индуктивность и активное сопротивление обмотки якоря накопителя, соответственно; $2p, w_s, l_a, a$ – число полюсов, число витков в фазе, активная длина и число параллельных ветвей обмотки якоря SEMEC накопителя, соответственно; D_a – диаметр якоря; B_{sr} – среднее значение индукции в зазоре; $\eta_{sum} = \eta_g \eta_m \eta_{inv} \eta_s \eta_{dc} \eta_s$ – общий к.п.д. передачи; f_{rr} – удельное значение сопротивления движению; L_{s_dc}, R_{s_dc} – индуктивность и активное сопротивление преобразователя, соответственно; K_{chT}, K_{chB} – коэффициенты преобразования в режимах ускорения и торможения, соответственно.

Математическая модель тягового блока [14]

| Режим ускорения | Режим торможения |
|---|--|
| Баланс мощности накопителя | |
| $-J_s \frac{d\omega_s}{dt} \omega_s \eta_s = u_s i_s$ | $J_s \frac{d\omega_s}{dt} \omega_s = u_s i_s \eta_s$ |
| Уравнение равновесия для напряжения на SEMEC | |
| $u_s = e_s - L_s \frac{di_s}{dt} - i_s R_s$ | $u_s = e_s + L_s \frac{di_s}{dt} + i_s R_s$ |
| Мощность, развиваемая подвижным составом | |
| $(m_{ps} \frac{dv_{ps}}{dt} - F_{rr}) v_{ps} = u_{dc} i_{inv} \eta_{inv} \eta_m \eta_g$ | $-(m_{ps} \frac{dv_{ps}}{dt} - F_{rr}) v_{ps} \eta_{inv} \eta_m \eta_g = u_{dc} i_{inv}$ |
| ЭДС SEMEC накопителя | |
| $e_s = K_e \omega_s$, $K_e = \frac{2 p w_s N_f l_a D_a}{a} \sin \theta \cdot B_{sr}$ | |
| Ток в звене постоянного тока | |
| $K_{chT} = \frac{U_{dc}}{U_s}$, $i_{inv} = i_{ch} + i_p = \frac{i_s \eta_s}{K_{chT}} + i_p$ | $K_{chB} = \frac{U_s}{U_{dc}}$, $i_{inv} = i_{ch} - i_p = \frac{i_s K_{chB}}{\eta_s} - i_p$ |
| Математическая модель процесса преобразования энергии | |
| $\begin{cases} \frac{dv_{ps}}{dt} = \frac{\eta_{inv} \eta_m \eta_g u_{dc} (i_s \eta_s / K_{chT} + i_p)}{m_{ps} v_{ps}} + f_{rr}; \\ \frac{di_s}{dt} = \frac{K_e \omega_s - u_{dc} / K_{chT} - i_s (R_s + R_{s_dc})}{L_s + L_{s_dc}}; \\ -\frac{d\omega_s}{dt} = \frac{1}{J_s \eta_s} K_e i_s \end{cases}$ | $\begin{cases} \frac{dv_{ps}}{dt} = \frac{u_{dc} (i_s \eta_s / K_{chB} - i_p)}{\eta_{inv} \eta_m \eta_g m_{ps} v_{ps}} - f_{rr}; \\ \frac{di_s}{dt} = \frac{u_{dc} / K_{chB} - K_e \omega_s - i_s (R_s + R_{s_dc})}{L_s + L_{s_dc}}; \\ \frac{d\omega_s}{dt} = \frac{\eta_s}{J_s} K_e i_s \end{cases}$ |
| Связь между частотой вращения ротора накопителя и скоростью движения подвижного состава | |
| $\omega_{s(k+1)} = \sqrt{\omega_{sk}^2 - \frac{m_{ps} (v_{ps(k+1)}^2 - v_{psk}^2)}{J_s \eta_{sum}}}$ | $\omega_{s(k+1)} = \sqrt{\omega_{sk}^2 + \frac{m_{ps} \eta_{sum} (v_{psk}^2 - v_{ps(k+1)}^2)}{J_s}}$ |

Важно отметить, что в состав модели входят две регулируемые компоненты – ЭДС SEMEC накопителя (K_e) и ток звена постоянного тока (K_{ch}), воздействие на которые обеспечивает управляемый переток мощности между компонентами схемы тягового блока.

Управление процессом обмена мощностью в режимах разгона и торможения подвижного состава программно реализуется в соответствии со схемой, указанной на рис. 4 (режим торможения), на основании логических элементов [14].

В блоке управления (СВ) реализуются функции:

$$f_{ch}(T_{set}, v_{ps}) = K_{ch0} + (K_{psch} / T_{set}) v_{ps},$$

$$f_e(T_{set}, v_{ps}) = K_e 0 v_{ps}^2 + (K_{pse} / T_{set}) v_{ps}.$$

При этом выполняются следующие условия.

Для режима торможения:

1. Если ток инвертора $i_{inv} \in [i_{min}; i_{max}]$, то $K_{ch} = f_{ch}(T_{set}, v_{ps})$, $K_e = f_e(T_{set}, v_{ps})$.
2. Если $i_{inv} > i_{max}$, то $K_{ch} = K_{ch\ max}$, $K_e = K_{e\ max}$.
3. Если $i_{inv} < i_{min}$, то $K_{ch} = K_{ch\ min}$, $K_e = f_e(T_{set}, v_{ps}) / 4$.

Для режима ускорения:

1. Если ток инвертора $i_{inv} \in [i_{min}; i_{max}]$, то $K_{ch} = f_{ch}(T_{set}, v_{ps})$, $K_e = f_e(T_{set}, v_{ps})$.
2. Если $i_{inv} > i_{max}$, то $K_{ch} = K_{ch\ min}$, $K_e = f_e(T_{set}, v_{ps}) / 4$.
3. Если $i_{inv} < i_{min}$, то $K_{ch} = K_{ch\ max}$, $K_e = K_{e\ max}$.

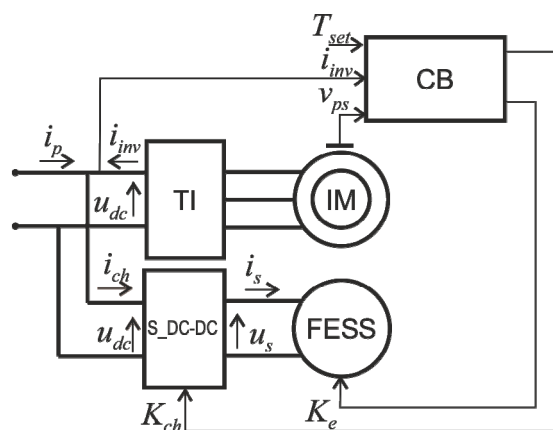


Рис. 4. Система управления

Для оценки свойств работы накопителя в системе тягового электропривода предложен коэффициент эффективности работы накопителя [14]:

$$K_{efs} = \frac{J_s(\omega_{send}^2 - \omega_{sdv}^2)}{m_{ps}(v_{psstB}^2 + v_{psendT}^2)}, \quad (22)$$

где v_{psstB} – скорость подвижного состава на момент начала торможения; v_{psendT} – скорость подвижного состава на момент окончания разгона; ω_{send} – частота вращения ротора накопителя на момент окончания рекуперации; ω_{sdv} – частота вращения «мертвого объема».

Таким образом, получена математическая модель тягового блока, которая связывает процесс движения поезда в режимах ускорения, а также рекуперативного торможения с параметрами инерционного накопителя энергии, характеристиками тягового двигателя и преобразовательных устройств тягового электропривода. Сформированная на основании логических элементов система управления программно реализует перетоки мощности в рассмотренных режимах работы подвижного состава между тяговыми электродвигателями, накопителем и батареей топливных элементов (токи i_{mv} , i_{ch} , i_p , соответственно). Предложен критерий оценки эффективности использования рассматриваемой технологии.

Математическая модель топливного элемента.

Математическая модель топливного элемента (FC) понятна из схемы, представленной на рис. 2. Основными электрическими характеристиками топливного элемента являются: ЭДС E_{fc} , напряжение на выходе U_{fc} , внутреннее электрическое сопротивление R_{fc} , электрическая мощность P_{fc} , электрический коэффициент полезного действия η_E [16, 17].

Мощность, передаваемая на внешнюю нагрузку (полезная мощность), равна:

$$P_{fc} = U_{fc} I_{fc} = I_{fc} E_{fc} - I_{fc}^2 R_{fc}. \quad (23)$$

Электрическая мощность, рассеиваемая на внутреннем сопротивлении:

$$P_{fci} = (E_{fc} - U_{fc}) I_{fc} = \frac{(E_{fc} - U_{fc})^2}{R_{fc}} = I_{fc}^2 R_{fc}. \quad (24)$$

В вышеописанной интерпретации мощностей, электрический к.п.д. будет равен:

$$\eta_E = \frac{P_{fc}}{P_{fci} + P_{fc}} = \frac{U_{fc}}{E_{fc}}. \quad (25)$$

Информацию о топливном элементе и наглядность ее восприятия заключает в себе его вольтамперная характеристика (ВАХ). Она представляет собой графическую зависимость напряжения топливного элемента от тока в нагрузке. В большинстве случаев ВАХ твердотоксидных топливных элементов представляет собой прямую линию. Строго говоря, начальный и конечный участки ВАХ имеют отклонения от прямой линии, соответственно, вверх и вниз (обусловлено электрохимической поляризацией электродов для конечного участка). Эти отклонения в большинстве случаев незначительны и практически не выходят за пределы 10-15 % начала и конца участка кривой ВАХ, а в ряде случаев они вообще не наблюдаются. В большей степени важен средний участок

ВАХ. При этом с некоторым приближением можно считать, что точка пересечения линии ВАХ с осью напряжения характеризует ЭДС элемента, а точка пересечения ВАХ с осью тока характеризует ток короткого замыкания элемента. ВАХ хорошо аппроксимируется многочленом первого порядка

$$y = -kx + b, \quad (26)$$

$$U_{fc} = -I_{fc} R_{fc} + E_{fc},$$

где y и x – координаты напряжения и тока; k – угловой коэффициент, равный тангенсу α – угла наклона линии ВАХ к оси тока; b – величина отрезка, который отсекает линия ВАХ на оси напряжения (в нашем случае b равно E_{fc} элемента).

3. Концептуальный проект.

Задачей разработки концептуального проекта является выбор параметров тягового блока, инерционного накопителя энергии и батареи топливных элементов (в совокупности с водородным накопительным элементом) путем решения тяговой задачи и анализа полученных результатов. Преобразовательные агрегаты (P_DC-DC, S_DC-DC, П) будем рассматривать лишь с позиций возможности обеспечения с их помощью требуемых перетоков энергии между рассматриваемыми блоками. Очевидно, что их эффективная работа будет иметь место при условии максимально близких номинальных значений компонент мощности рассматриваемых устройств. При безусловном соблюдении баланса мощности и исходя из того, что упомянутые узлы тягового привода в звене постоянного тока соединены между собой параллельно, считаем, что именно значения напряжения этих узлов должны быть максимально близки. Выполнение этого условия, по нашему мнению, станет базой эффективного регулирования потоков мощности в различных режимах работы электроподвижного состава (ЭПС).

При выборе параметров узлов тягового привода будем исходить из того, что мощности блока топливных элементов и накопителя энергии практически одинаковы и накопитель работает только при разгоне и торможении поезда, а в режиме движения с установленной скоростью система обеспечивается энергией только от батареи топливных элементов.

Для расчета принимаем: длина поезда – 42 м, составность – 2 вагона, масса тары – 92 т, пассажироместность вагона – 280 человек, кузова вагонов опираются на 3 тележки – две концевые двухосные и одну промежуточную двухосную тележку Якобса, конструкционная скорость – 124 км/ч. Основное сопротивление движению вычисляется по формуле $F_{rr} = 1,5 + 0,006v_{ps} + 0,0067v_{ps}^2$. Внутренние оси концевых тележек оснащены тяговыми двигателями. Колесно-моторный блок каждой из этих осей содержит колесную пару с диаметром колес 0,95 м, двухступенчатый редуктор с передаточным числом 6,6 и к.п.д. 0,97, а также шести полюсный асинхронный тяговый двигатель. Поезд имеет две идентичные системы тягового привода, размещенные в каждом вагоне. В состав каждой входит водородный накопительный элемент, блок топливных элементов, инерционный накопитель энергии, тяговый двигатель и преобразовательные агрегаты.

Характеристики двигателя и параметры накопителя приведены в табл. 2 и 3, соответственно.

Таблица 2

Характеристики тягового двигателя

| P_m , кВт | U_m , В | I_m , А | $\cos \varphi_m$ | к.п.д. | S , % | f_i , Гц | n , об/мин |
|-------------|-----------|-----------|------------------|--------|---------|------------|--------------|
| 250 | 760 | 228 | 0,88 | 0,944 | 1,3 | 65 | 1283 |

Таблица 3

Параметры накопителя

| Параметр | Значение |
|--|--------------------|
| Габаритные размеры, мм: $D \times H$ | 900 × 830 |
| Энергия обмена, МДж | 26 |
| Мощность (максимальная), МВт | 0,27 |
| Напряжение (максимальное), В | 1054 |
| Ток номинальный, А | 250 |
| Маховик | |
| Материал | Углепластик + SmCo |
| Размеры, мм: диаметр внешний × диаметр внутренний × высота | 700 × 440 × 580 |
| Масса, кг | 674 |
| Момент инерции, кг·м ² | 57 |
| Частота вращения, 1/с: max...min | 1071...421 |
| Якорь | |
| Число полюсов | 4 |
| Полюсное деление, мм | 340 |
| Число фаз | 4 |
| Сечение проводника, мм ² | 50 |
| Индуктор | |
| Размеры магнита, мм: длина × высота × ширина | 340 × 420 × 15 |
| Индукция в активной зоне, Тл | 0,22 |
| Зазор, мм | 3 |

Кривые движения, силовые и энергетические зависимости, полученные для этого поезда при его движении по горизонтальному участку пути длиной 24,3 км показывают, что мощность источника питания в виде топливных элементов, а также инерционного накопителя на один вагон должна быть не менее 260 кВт. Маховик каждого инерционного накопителя энергии должен аккумулировать при торможении энергию обмена не менее 7,25 кВт·ч (энергия рекуперативного торможения составляет 14,49 кВт·ч).

Расчет и исследование работы тягового блока с системой управления (рис. 4) при значениях параметров блока управления, приведенных в табл. 4, проводились на базе математической модели (табл. 1). В качестве численного метода решения системы дифференциальных уравнений был выбран метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Расчет проводился для трех значений ускорения – 0,55 м/с², 0,37 м/с² и 0,28 м/с². Результаты расчета приведены на рис. 5.

Таблица 4

Значения параметров блока управления

| Параметр | Значение | Параметр | Значение | Параметр | Значение |
|---|----------|-------------------------------|----------|-------------|----------|
| K_{ch0} | 0,1 | K_{pse} , с ² /М | 7,3 | K_{chmin} | 0,1 |
| K_{psch} , с ² /М | 3,9 | i_{min} , А | 360 | K_{chmax} | 4 |
| K_{e0} , с ² /М ² | 0,05 | i_{max} , А | 440 | K_{emax} | 7,3 |

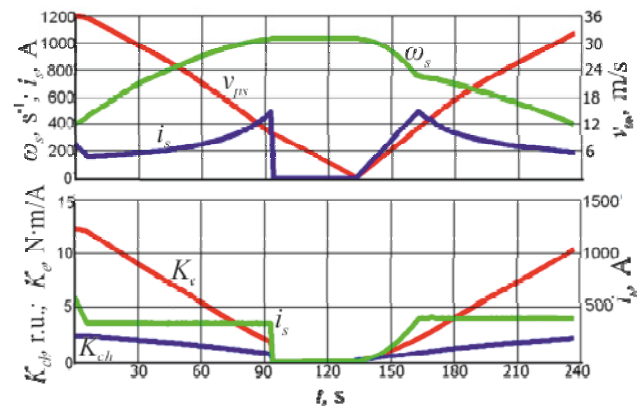


Рис. 5. Процесс обмена энергией при ускорении 0,55 м/с²

Анализ результатов расчета показал, что эффективность использования накопителя энергии при варьируемых ускорениях в пределах 0,55...0,28 м/с² составляет 28...37 %. Таким образом, использование накопителя дает возможность сэкономить за один цикл «торможение-разгон» около 40 % энергии.

Для рассматриваемого поезда наиболее подходят блоки топливных элементов модификации НурМTMHD30. Мощность блока – 31 кВт, ток – 0...500 А, напряжение – 60...120 В, максимальный к.п.д. – 55 %, размеры – 719×406×261 мм, масса – 72 кг. Рабочие характеристики представлены на рис. 6 [15].

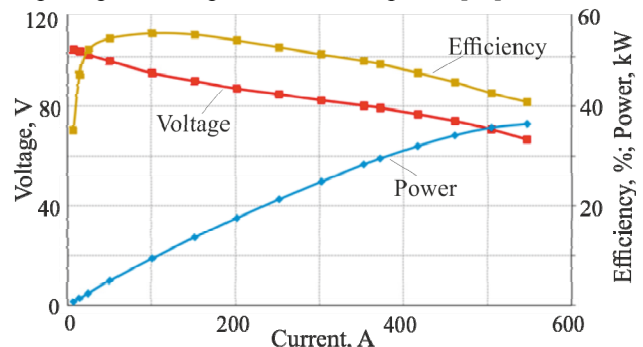


Рис. 6. Рабочие характеристики блока НурМTMHD30

9 таких блоков, включенных последовательно, на каждом вагоне обеспечат мощность источника питания 280 кВт в интервале напряжений 540...1080 В при изменении нагрузки от 0 до 500 А. Такая батарея, размещенная в контейнере размером 2,2×1,5×0,4 м, будет весить 650 кг, и без проблем может быть размещена на крыше вагона.

Необходимая потребность в водороде при движении подвижного состава без накопителя в режимах разгона и движения с постоянной мощностью определяется по формуле

$$M_H = \frac{E_{Hfc} - E_{Hs}}{E_{Hsp} \eta_E}, \quad (27)$$

где E_{Hfc} – электрическая энергия батареи топливных элементов; E_{Hs} – энергия рекуперации при торможении и последующего ее использования при разгоне; E_{Hsp} – удельный весовой энергетический показатель водородного топлива.

Для нашего случая при $E_{Hfc} = 396$ МДж, $E_{Hs} = 63$ МДж, $E_{Hsp} = 120$ МДж/кг и $\eta_E = 0,55$ расход водо-

рода на один транспортный цикл составит при работе без накопителя 3,9 кг, а с накопителем – 3 кг.

При емкости используемых в настоящее время баков с давлением 35 МПа и массой водорода 5 кг [16], 6 таких баков при массе ≈ 700 кг и занимаемом объеме 2,86 м³ обеспечат движение рассматриваемого поезда при отсутствии накопителя без дозаправки 188 км. В случае использования накопителя пробег составит без дозаправки 250 км.

Таким образом, применение накопителя при его однократном использовании в простейшем транспортном цикле без учета рациональных соотношений параметров блока управления дает довольно ощутимый эффект – экономия не менее 24,5 % водорода.

Выводы и перспективы дальнейшего развития.

Проведенные исследования выполнены на базе математической модели тягового электропривода поезда на топливных элементах с инерционным накопителем энергии, которая представляет собой совокупность отдельных блоков дифференциальных и алгебраических уравнений для поезда и различных узлов схемы тягового электропривода. Эту модель следует рассматривать как базовую. Для исследований поведения подвижного состава в условиях, приближенных к реальным, необходимо на базе разработанных математических моделей создать объединенную систему дифференциальных уравнений, с помощью которой связать работу всех блоков системы тягового электропривода, включая работу преобразовательных агрегатов полупроводниковых устройств, с координатами пути как во времени, так и в пространстве.

Решение такой задачи, безусловно, потребует создания единой трехуровневой интеллектуальной системы управления.

Первый уровень должен определять необходимую поезду мощность, управлять скоростью транспортного средства и передавать требуемое ускорение или замедление на второй и третий уровни.

Второй уровень должен управлять распределением потоков мощности и энергии между различными компонентами тяговой цепи: батареей топливных элементов, накопителем энергии и исполнительным механизмом – тяговым асинхронным двигателем.

Третий уровень должен воздействовать на средства управления отдельными компонентами и регулировать их состояние в зависимости от генерируемой или потребляемой этими компонентами мощности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thorne R., Amundsen A.H., Sundvor I. Battery electric and fuel cell trains: maturity of technology and market status. *Report 1737/2019. Institute of Transport Economics*, 2020. 32p. Режим доступа: <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=52027> (Дата обращения: 22.03.2021).
2. Hoffrichter A., Hillmann S., Roberts C. Conceptual propulsion system design for a hydrogen-powered regional train. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 56-66. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2014.0049>.
3. Fender K. *Development of hydrogen-powered trains continues, but battery-powered equipment making more inroads*. December 14, 2020. Режим доступа:

<https://www.trains.com/trn/news-reviews/news-wire/development-of-hydrogen-powered-trains-continues-but-battery-powered-equipment-making-more-inroads> (Дата обращения: 22.03.2021).

4. Furuta R., Kawasaki J., Kondo K. Hybrid traction technologies with energy storage devices for nonelectrified railway lines. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 291-297. doi: <https://doi.org/10.1002/tee.20532>.

5. Ogawa K., Yamamoto T., Hasegawa H., Furuya T. Development of the fuel-cell/battery hybrid railway vehicle. *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009, pp. 1730-1735. doi: <https://doi.org/10.1109/vppc.2009.5289693>.

6. Chen X., Shen W., Vo T.T., Cao Z., Kapoor A. An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, 2012, pp. 230-235. doi: <https://doi.org/10.1109/asscc.2012.6523269>.

7. Baumann M., Peters J. F., Weil M., Grunwald A. CO₂ footprint and life-cycle costs of electrochemical energy storage for stationary grid applications. *Energy Technology*, 2017, vol. 5, no. 7, pp. 1071-1083. doi: <https://doi.org/10.1002/ente.201600622>.

8. Liu X., Li K. Energy storage devices in electrified railway systems: A review. *Transportation Safety and Environment*, 2020, vol. 2, no. 3, pp. 183-201. doi: <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa016>.

9. Hedlund M., Lundin J., De Santiago J., Abrahamsson J., Bernhoff H. Flywheel energy storage for automotive applications. *Energies*, 2015, vol. 8, no. 10, pp. 10636-10663. doi: <https://doi.org/10.3390/en81010636>.

10. Engel B., Söffker C., Hörl F. *The innovative traction system with the flywheel of the LirexTM*. Режим доступа: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/457.pdf> (Дата обращения: 22.03.2021).

11. Ogawa K., Yoneyama T., Sudo T., Kashiwagi T., Yamamoto T. Performance improvement of fuel cell hybrid powered test railway vehicle. *Quarterly Report of RTRI*, 2021, vol. 62, no. 1, pp. 16-21. doi: https://doi.org/10.2219/rtrtrq.62_1_16.

12. Омеляненко В.И., Рябов Е.С., Оверьянова Л.В. Инерционный накопитель энергии – перспективная технология энергосбережения для электроподвижного состава. *Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения*, 2013, № 1 (65), С. 38-54.

13. Omelianenko H.V., Overianova L.V., Maslii A.S. Geometric and electrophysical parameters of armature winding of electromechanical converter of inertial energy storage for suburban trains. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 65-71. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.1.11>.

14. Северин В.П., Омеляненко О.В. Тяговый привод электропоезда с инерционным накопителем энергии. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Силовa електроніка і енергоефективність*, 2017, № 27 (1249), С. 276-279. Режим доступа: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/33984/1/vestnik_KhPI_2017_27_Severin_Tyagovyy_privod.pdf (Дата обращения: 22.03.2021).

15. *HyPMTM HD 30 Heavy Duty Fuel Cell Power Module*. Режим доступа: <https://pdf.directindustry.com/pdf/hydrogenics/hypm-hd-30/33492-420319.html> (Дата обращения: 22.03.2021).

16. Ahluwalia R.K., Hua T.Q., Peng J.-K. Fuel cycle efficiencies of different automotive on-board hydrogen storage options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, vol. 32, no. 15, pp. 3592-3602. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.03.021>.

REFERENCES

1. Thorne R., Amundsen A.H., Sundvor I. Battery electric and fuel cell trains: maturity of technology and market status. *Report 1737/2019. Institute of Transport Economics*, 2020. 32p. Avail-

able at: <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=52027> (accessed 22 March 2021).

2. Hoffrichter A., Hillmansen S., Roberts C. Conceptual propulsion system design for a hydrogen-powered regional train. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 56-66. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2014.0049>.

3. Fender K. *Development of hydrogen-powered trains continues, but battery-powered equipment making more inroads*. December 14, 2020. Available at: <https://www.trains.com/trn/news-reviews/news-wire/development-of-hydrogen-powered-trains-continues-but-battery-powered-equipment-making-more-inroads> (accessed 22 March 2021).

4. Furuta R., Kawasaki J., Kondo K. Hybrid traction technologies with energy storage devices for nonelectrified railway lines. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 291-297. doi: <https://doi.org/10.1002/tee.20532>.

5. Ogawa K., Yamamoto T., Hasegawa H., Furuya T. Development of the fuel-cell/battery hybrid railway vehicle. *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009, pp. 1730-1735. doi: <https://doi.org/10.1109/vppc.2009.5289693>.

6. Chen X., Shen W., Vo T.T., Cao Z., Kapoor A. An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, 2012, pp. 230-235. doi: <https://doi.org/10.1109/asscc.2012.6523269>.

7. Baumann M., Peters J. F., Weil M., Grunwald A. CO₂ footprint and life-cycle costs of electrochemical energy storage for stationary grid applications. *Energy Technology*, 2017, vol. 5, no. 7, pp. 1071-1083. doi: <https://doi.org/10.1002/ente.201600622>.

8. Liu X., Li K. Energy storage devices in electrified railway systems: A review. *Transportation Safety and Environment*, 2020, vol. 2, no. 3, pp. 183-201. doi: <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa016>.

9. Hedlund M., Lundin J., De Santiago J., Abrahamsson J., Bernhoff H. Flywheel energy storage for automotive applications. *Energies*, 2015, vol. 8, no. 10, pp. 10636-10663. doi: <https://doi.org/10.3390/en81010636>.

10. Engel B., Söffker C., Hörl F. *The innovative traction system with the flywheel of the LirexTM*. Available at: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/457.pdf> (accessed 22 March 2021).

11. Ogawa K., Yoneyama T., Sudo T., Kashiwagi T., Yamamoto T. Performance improvement of fuel cell hybrid powered test railway vehicle. *Quarterly Report of RTRI*, 2021, vol. 62, no. 1, pp. 16-21. doi: <https://doi.org/10.2219/rtrigr.62.1.16>.

12. Omelyanenko V.I., Riabov Ie.S., Overianova L.V. Inertial energy storage device as an advanced energy conservation technology for electric rolling stock. *Vestnik VELNII*, 2013, no. 1 (65), pp. 38-54. (Rus).

13. Omelianenko H.V., Overianova L.V., Maslii A.S. Geometric and electrophysical parameters of armature winding of electromechanical converter of inertial energy storage for suburban trains. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 65-71. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.1.11>.

14. Severin V.P., Omelianenko O.V. Traction drive of electric train with inertial energy storage. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of Automated Electrodrives. Theory and Practice. Power Electronics and Energy Efficiency*, 2017, no. 27 (1249), pp. 276-279. Available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/33984/1/vestnik_KhPI_2017_27_Severin_Tyagovyy_privod.pdf (accessed 22 March 2021). (Rus).

15. *HyPMTM HD 30 Heavy Duty Fuel Cell Power Module*. Available at: <https://pdf.directindustry.com/pdf/hydrogenics/hypm-hd-30/33492-420319.html> (accessed 22 March 2021).

16. Ahluwalia R.K., Hua T.Q., Peng J.-K. Fuel cycle efficiencies of different automotive on-board hydrogen storage options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, vol. 32, no. 15, pp. 3592-3602. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.03.021>.

Надійшла (Received) 13.05.2021
 Прийнята (Accepted) 17.06.2021
 Опублікована (Published) 27.08.2021

Омельяненко Віктор Іванович¹, д.т.н., проф.,
 Рябов Євген Сергійович¹, к.т.н., с.н.с.,
 Овер'янова Лілія Вікторівна¹, к.т.н., доц.,
 Омельяненко Галина Вікторівна¹, к.т.н., доц.,
¹ Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут»,
 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
 e-mail: vicel@ukr.net; riabov.ievgen@gmail.com;
 overanova@ukr.net (Corresponding author);
 omeljanenkhalina@i.ua

V.I. Omelyanenko¹, Ie.S. Riabov¹, L.V. Overianova¹,
 H.V. Omelianenko¹

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train.

The aim of the work is to study the possibility and features of the use of inertial storage devices in the traction electric drive of multi unit train with a power plant based on fuel cells. **Methodology.** The principle of power flow control in traction electric drives in the modes of acceleration and braking of rolling stock is proposed. The mathematical model of the traction electric drive in the form of the combination of three components: the train, the traction unit and the battery of fuel cells is developed. It was used to study the operation of a traction electric drive when solving a test traction task for rolling stock. **Results.** It is established that the use of inertial energy storage reduces hydrogen consumption by at least 25 %, which increases the mileage of rolling stock between equipment by more than 30 %. **Originality.** The traction electric drive on the basis of fuel elements and the inertial energy storage for the multi unit train is offered. The work of the proposed traction electric drive in solving the test traction problem for rolling stock is investigated. **Practical significance.** A mathematical model of the traction electric drive has been developed. The test traction problem for rolling stock is solved. References 16, tables 4, figures 6.

Key words: traction electric drive, fuel cell, inertial storage, multi unit train.