

Омельяненко В. И., д. т. н., профессор,
Любарский Б. Г., к. т. н., доцент,
Оверьянова Л. В., ассистент,
 Кафедра электрического транспорта и тепловозостроения НТУ «ХПИ»,
Рябов Е. С., к. т. н., заведующий сектором, ГП «Электротряжмаш»

УДК 629.439.4.027

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ПРИГОРОДНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА С ИНЕРЦИОННЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Предлагается концептуальный проект пригородного электропоезда с бортовым инерционным накопителем энергии в виде кольцевого моховика и обращенной машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Показан эффект экономии энергии при режиме работы поезда «торможение — стоянка — разгон».

Н и у кого не вызывает сомнений в необходимости замены морально устаревшего и физически изношенного электроподвижного состава (ЭПС) пригородного сообщения, эксплуатируемого в настоящее время на железных дорогах страны. Очевидно, что новый подвижной состав такого назначения должен создаваться на базе современных и перспективных технологий транспортного машиностроения. Одной из таких технологий является гибридная система тягового электропривода, в которой при обмене энергией между контактной сетью и тяговыми двигателями принимают участие накопители энергии.

Целью настоящей статьи является ознакомление со своим видением концепции перспективного пригородного электропоезда с бортовым инерционным накопителем энергии как одним из эффективных средств энергосбережения.

Структура и технические характеристики такого поезда приняты по результатам анализа параметров современных пригородных поездов Европы.

Подробно описана структурная схема асинхронного тягового электропривода для предложенного поезда. Отличительной особенностью этой схемы является наличие в ее составе инерционного накопителя энергии, представляющего собой сочетание кольцевого моховика и обращенной машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводниковым коммутатором на базе IGBT-транзисторов.

Приведены полученные путем математического моделирования показатели эффективности работы накопителя для поезда с конкретными техническими параметрами при его работе в цикле «торможение — стоянка — разгон».

Современные пригородные электропоезда и один из путей повышения их энергоэффективности

Изготовители и поставщики современного и перспективного подвижного состава должны удовлетворять требования как пассажиров, так и операторов тех предприятий, которые этот подвижной состав эксплуатируют.

Требования к современным электропоездам со стороны пассажиров сводятся к повышению комфорта: плавности хо-

да, сокращению времени поездки, удобному расположению мест для сидения, оптимальному освещению, наличию кондиционирования воздуха, привлекательности внешнего вида и интерьера.

Требования со стороны операторов заключаются в снижении затрат на эксплуатацию и обслуживание, а также в обеспечении высокого уровня безопасности и надежности электропоездов при росте провозной способности и экономии энергоресурсов. Последние два требования могут быть удовлетворены благодаря снижению массы тары вагонов, уменьшению сопротивления движению, повышению максимальной эксплуатационной скорости и ускорения при сокращении потребления электроэнергии.

Основные технические характеристики большинства типов электропоездов, эксплуатируемых на пригородных железных дорогах Европы и соответствующих перечисленным выше требованиям, приведены в табл. 1 [1–9].

При анализе этих данных необходимо отметить, что все перечисленные в таблице поезда имеют сочлененную конструкцию: концы промежуточных смежных вагонов опираются на общие тележки Якобса. Концевые вагоны имеют по одной обычной двухосной тележке. Это техническое решение приводит к уменьшению числа тележек и, как следствие, к снижению массы состава, а также сопротивления движению. Кроме того, благодаря жесткому соединению вагонов удается повысить динамическую устойчивость поезда и снизить уровень вибраций, что положительно сказывается на комфортности для пассажиров.

Вагоны в таких поездах соединяются между собой широко междувагонными переходами. Это техническое решение при постоянной составности обеспечивает хорошую просматриваемость поезда по всей длине, что создает у пассажиров субъективное ощущение безопасности.

Число вагонов в поездах колеблется от трех до восьми. При средней длине вагона 16,6–18,8 м (исключение составляет поезд 19WE — 21,3 м и Spactium 3,06 — 13,5 м) и ширины 2,84–3,06 м (исключение — поезд Sm5 — 3,2 м) пассажироместность, как правило, составляет 108–114 пассажи-

Таблица 1. Технические характеристики современных пригородных электропоездов Европы

Показатели	Тип поезда												
	422 [1]	425 [2]	Talent2 [3]	Talent ÖBB [4]		Sprinter Light-train [5]		Flirt-Sm5 [6]	Flirt-SNTF [7]	19WE [8]		Z50000 (Spacium 3,06) [9]	
Осевая формула	${}^1)B_0(B_0)(2)(B_0)B_0$	$B_0(B_0)(2)(B_0)B_0$	$B_0(B_0)(2)(B_0)B_0$	$B_0(2)(2)(2)B_0$	$B_0(2)(2)B_0$	$B_0(2)B_0(2)B_0(2)B_0$	$B_0(2)(2)B_0(2)B_0$	$B_0(2)(2)(2)B_0$	$B_0(2)(2)(2)B_0$	$B_0(2)...(2)B_0$	$B_0(2)B_0B_0(2)(2)B_0(2)B_0$		
Количество вагонов	4	4	4	4	3	4(без ')	6 (с учетом')	4	4	4	6	7(без ')	8(с ')
Размеры, м	69,4	67,5	72,3	66,87	52,12	69,36	100,54	75,2	74,1	85,28	126,25	94,3	112,5
длина	3,02	2,84	2,93	2,93	2,93	2,84	2,84	3,2	2,88	2,89	2,89	3,06	3,06
ширина	4,34	—	4,26	4,33	4,23	4,21	4,21	4,4	4,28	4,2	4,2	4,28	4,28
высота													
Количество мест общее	536	434	445	451	311	435	680	583	930	557	895	873	1055
сидячих	192	206	195	199	151	222	332	260	144	183	293	405	503
Масса тары, т	112	110	130	116,4	94,5	129	176	132	120	190	270	210	235
Нагрузка на ось, т	16	18	18	—	—	18,5		—	20	16,5		—	
Диаметр колес, мм	—	850	${}^2)840$ 770	760 690	760 690	850 780		860 800	870 760	920 870		—	
Макс. скорость, км/ч	140	140	160	140	140	160		160	120	160		140	
Ускорение, м/с ²	—	1,0	—	1...1,3	1...1,3	0,76		1,2	1,2	1,2	1	0,87...1,05	
Мощность, кВт	1600	2350	2280	1523	1444	1500	2000	2000	2000	2240		2620	2950
Количество ТЭД	8	8	6	4	4	6	8	4	4	8		10	
Сила тяги, кН	—	130	150	110	104	117	175	200	200	—		—	
Уд. масса, кг/пас	209	253	292	258	304	241	259	226	129	341	302	241	223
Уд. мощность, кВт/кг	0,0143	0,021	0,0175	0,0131	0,0153	0,0116	0,0113	0,0152	0,0167	0,0118	0,0083	0,0125	
Энергопотребление, кВт·ч/пас·км	0,0213	0,0387	0,032	0,0241	0,033	0,0216	0,0183	0,0216	0,0179	0,0251	0,0156	0,0214	0,02

Примечание.

- 1) B_0 — двухосная моторная тележка обычная, (B_0) — двухосная моторная тележка Якобса, (2) — двухосная поддерживающая тележка Якобса
- 2) в числителе — новые тележки, в знаменателе — изношенные тележки

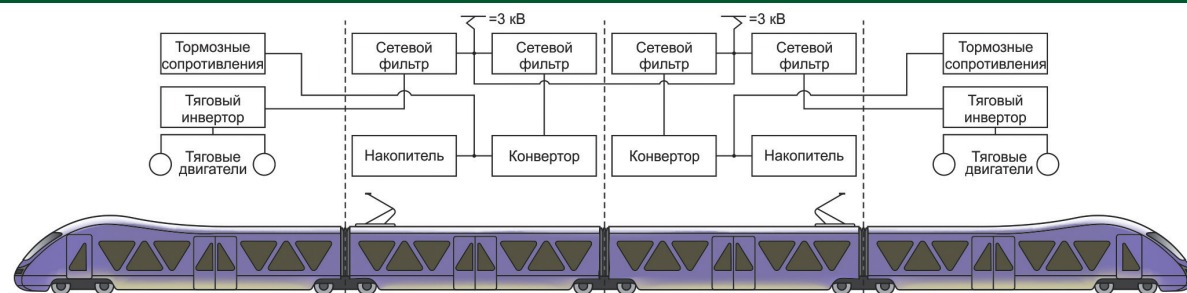


Рис. 1. Схема размещения тягового оборудования базового поезда

ров на вагон. Более высокие значения этого показателя получают за счет числа пассажиров, едущих стоя, как это имеет место в поезде Flirt SNTF (8 чел/м² вместо 4 чел/м²), либо за счет снижения мест для сидения (до 183 в четырехвагонном и до 293 в шестивагонном поездах 19WE), либо за счет увеличения ширины вагона (Flirt Sm5).

Так как масса тары рассматриваемых поездов составляет в среднем 76% общей массы полностью заполненного поезда (исключением является поезд Flirt SNTF), эффективным средством энергосбережения является их эксплуатационная гибкость. Под этим термином понимается способность базовых поездов из различного количества вагонов объединяться в один сцеп с управлением по системе многих единиц.

Таблица 2. Технические характеристики базового поезда

Система тягового электроснабжения, кВ	3
Длина поезда, м	76
Ширина вагона, м	3,2
Высота над УГР, м	4,4
Количество пассажиров	560
Осевая формула	$B_0(2)(2)(2)B_0$
Масса тары, т	140
Максимальная скорость, км/ч	120
Максимальное ускорение, м/с ²	1
Мощность на тягу, кВт	1720
Сила тяги при трогании, кН	148
Количество двигателей	4

Довольно низкое значение отношения массы тары подвижного состава к количеству пассажиров (на одного пассажира, за некоторым исключением, приходится 209–304 кг массы тары) обусловлено применением для конструкции вагонов экструдированных профилей из алюминиевых сплавов и современных отделочных материалов. В значительной мере это значение обеспечено применением для тяги электропривода на базе асинхронных электродвигателей с удельной массой 1,26–1,42 кг/кВт и преобразователей на IGBT-транзисторах с удельной массой 0,85–1,98 кг/кВт.

Рациональная общая схема компоновки тягового привода, распределенного, как правило, на две независимых группы, обеспечивает высокий уровень надежности. Привод рассчитан на обеспечение необходимого уровня тяги и торможения при работе только одной из групп. При достаточно высоком уровне энерговооруженности (каждый килограмм тары в среднем обеспечен мощностью 0,014 кВт) имеет место вполне приемлемое удельное энергопотребление: среднее значение этого показателя составляет 0,0239 кВт·ч/пасс.км.

Исходя из вышеизложенного, а также учитывая рекомендации ОАО «РЖД» «Об утверждении типов и основных харак-

теристик моторвагонного подвижного состава» [10], в качестве базы для концептуального проекта будем рассматривать четырехвагонный электропоезд сочлененного типа. Концы смежных промежуточных вагонов этого электропоезда должны опираться на тележки Якобса, а головные части концевых вагонов — на обычные двухосные моторные тележки. Технические данные и схема размещения оборудования базового поезда показаны в табл. 2 и на рис. 1.

Приведенная базовая конфигурация позволит приспособить пассажироместимость отдельных поездов к суточным колебаниям пассажиропотока. В часы пиковых нагрузок могут эксплуатироваться составы, образованные из нескольких базовых поездов, а в часы спада — одиночные базовые поезда.

Существенным отличительным признаком предлагаемого поезда является то, что в системе его тягового электропривода предусматривается накопитель энергии, который в режиме торможения должен запасать кинетическую энергию поезда, чтобы впоследствии при разгоне поезда выдавать ее в тяговую цепь. Учитывая то, что режимы разгона и торможения для электропоездов пригородного сообщения являются штатными, эффект существенного энергосбережения от применения накопителя вполне ожидаем.

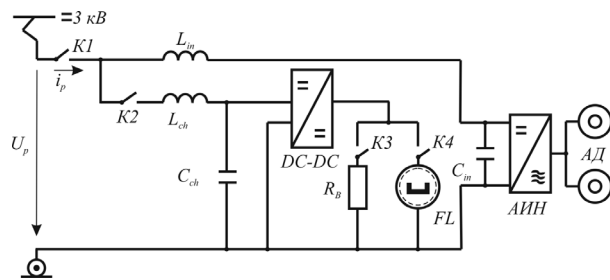


Рис. 2. Структурная схема тягового агрегата: DC-DC — buck & boost DC-DC — конвертор; FL — система инерционного накопителя; АИИ — автономный инвертор напряжения; АД — асинхронный двигатель; K1–K4 — ключи; L_{in} , L_{ch} , C_{ch} , C_m — индуктивности и емкости сетевых фильтров; R_B — тормозной резистор, U_p , i_p — напряжение и ток контактной сети

Схема тягового электропривода с инерционным накопителем энергии

Тяговый привод, состоящий из двух идентичных тяговых агрегатов, получает питание через аппаратуру защиты от одного из двух токоприемников, соединенных между собой высоковольтным кабелем, который проложен по крыше вагонов. Тяговый агрегат, схема которого приведена на рис. 2, содержит две параллельно включенных цепи — тяги и накопителя. Каждый из преобразователей этих цепей имеет прямое подключение к тяговой сети через входной фильтр.

Цепь тяги включает сетевой фильтр, тяговый преобразователь и два параллельно подключенных тяговых двигателя. Сетевой фильтр защищает электропривод от возможных перенапряжений в тяговой сети, а также служит для защиты и самой контактной сети от гармоник критического диапазона, генерируемых тяговым приводом. Тяговый преобразователь, обеспечивающий регулирование величины момента

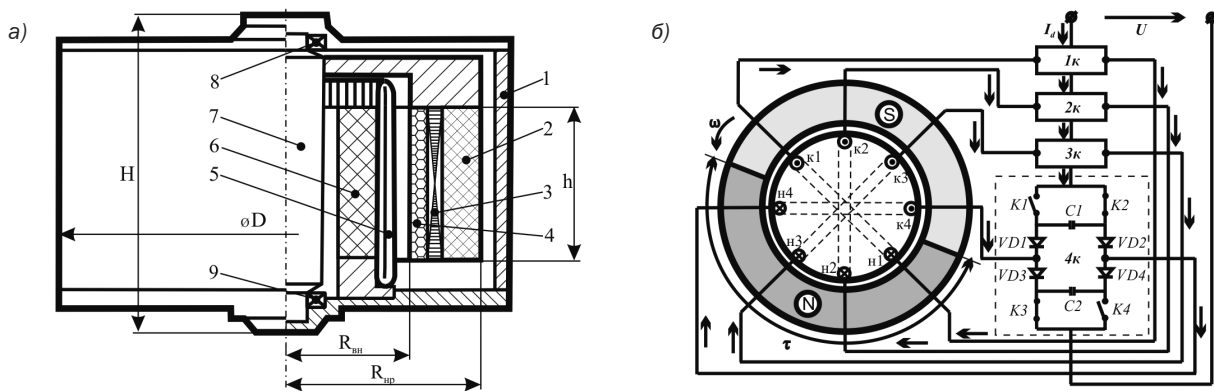


Рис. 3. Инерционный накопитель энергии: а) устройство аккумулятора; б) схема СЭМПЭ: 1 — вакуумный кожух; 2 — маховик; 3 — ферромагнитный экран; 4 — постоянные магниты; 5 — обмотка якоря; 6 — корпус статора; 7 — вал; 8, 9 — подшипниковые узлы; H , D — габаритные высота и диаметр накопителя; $R_{вн}$, $R_{нр}$ — внутренний, наружный радиусы маховика; h — высота маховика; ω — частота вращения ротора; τ — полюсное деление; $n1$, $n2$, $n3$, $n4$ и $k1$, $k2$, $k3$, $k4$ — начала и концы секций катушек якоря соответственно; $1к-4к$ — коммутаторы; $K1$, $K2$, $K3$, $K4$ — ключи; $VD1$, $VD2$, $VD3$, $VD4$ — диоды; $C1$, $C2$ — конденсаторы; I_d — ток источника; U — напряжение на зажимах

и частоты вращения асинхронных двигателей, представляет собой АИН с ШИМ, созданный на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Основным исполнительным механизмом тягового привода являются асинхронные двигатели.

Цепь накопителя состоит из сетевого фильтра, конвертора, тормозных резисторов и накопителя энергии. Сетевой фильтр выполняет те же функции, что и в тяговой цепи. В тормозном резисторе рассеивается энергия при реостатном торможении.

Конвертор представляет собой buck & boost DC-DC-преобразователь, который позволяет регулировать напряжение на его входе со стороны накопителя как «вверх», так и «вниз» относительно напряжения со стороны тягового двигателя, а также обеспечивать такие же условия регулирования напряжения при возврате энергии с накопителя [11].

Поскольку все упомянутые выше элементы схемы электропривода являются типичными, подробно остановимся лишь на описании инерционного накопителя, представляющего собой сочетание маховика и обращенной машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводниковым коммутатором [12].

При торможении электроподвижного состава энергия замедления его массы преобразуется накопителем в кинетическую энергию вращения маховика, а при разгоне кинетическая энергия маховика накопителя передается в систему тягового привода, нагрузкой которого является масса подвижного состава.

Накопитель включает в себя ряд систем: систему аккумуляции энергии, систему электромеханического преобразования энергии, систему подвеса аккумулятора механической энергии, систему вакуумирования и систему управления.

Система аккумуляции обеспечивает запасание, хранение и выдачу энергии в виде энергии вращающейся массы — маховика.

Система электромеханического преобразования (СЭМПЭ) реализует перетоки энергии между системой аккумуляции и системой тягового электропривода, работающего в качестве источника или потребителя аккумулируемой маховиком энергии.

Система подвеса обеспечивает стабилизацию в пространстве аккумулятора механической энергии — маховика.

Система вакуумирования дает возможность снижать аэродинамические потери, возникающие при вращении маховика.

Система управления согласовывает работу накопителя и режимы движения ЭПС.

Схема конструкции аккумулятора и СЭМПЭ накопителя приведена на рис. 3. Она включает неподвижную часть — статор и вращающуюся часть — ротор, которые связаны между собой с помощью либо высокооборотных подшипников качения, либо посредством бесконтактного электромагнитного подвеса [13; 14]. Для снижения аэродинамических потерь накопитель помещается в герметичный кожух, который вакуумируется.

Аккумулятор механической энергии представляет собой кольцевой маховик с вертикальной осью вращения ротора — полого цилиндра, изготовленного из композита на базе углеволокна, с помощью которого бандажируются элементы магнитной системы — постоянные магниты и ферромагнитный экран.

В качестве системы электромеханического преобразования энергии принята обращенная электрическая машина постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводниковым коммутатором. Вращающийся индуктор представляет собой переменнопольную магнитную систему. Обмотка якоря состоит из отдельных секций: катушек, шаг ко-

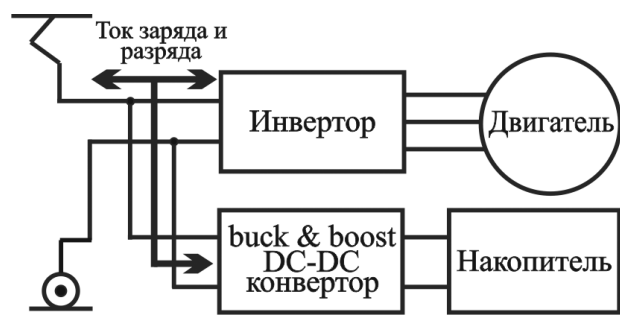


Рис. 4. Функциональная схема привода

торых равен полюсному делению τ . Соединяясь между собой определенным образом, катушки образуют фазы. Каждая из фаз включается в нагрузку мостовых инверторов тока, которые в свою очередь, соединяясь последовательно, образуют обмотку якоря.

Схема простейшей машины такого типа приведена на рис. 3, б. В этом случае представлена двухполюсная четырехфазная машина, каждая фаза которой содержит по одной катушке, смещенной по окружности якоря на угол, пропорциональный τ/N_p , где N_p — число фаз.

Чтобы сделать устройство компактным, электромеханический преобразователь энергии размещается внутри полого цилиндрического ротора. Обмотка якоря закрепляется на наружной цилиндрической поверхности статора, а магниты системы возбуждения фиксируются на внутренней поверхности коаксиально охватывающего статор полого цилиндра ротора.

Накопитель запасает энергию, когда СЭМПЭ работает в режиме двигателя, и частота вращения ротора увеличивается. Накопитель выдает энергию, когда СЭМПЭ переходит в режим генератора, и частота вращения ротора снижается. От момента инерции ротора и частоты его вращения зависит уровень запасенной энергии. Уровень мощности накопителя определяется параметрами СЭМПЭ, а также системой управления как коммутатором СЭМПЭ, так и общей системой управления накопителем.

Описанная выше схема электропривода позволяет использовать для тяги ток, поступающий как из контактной сети, так и от накопителя энергии. При рекуперации энергия торможения может быть возвращена и в контактную сеть, и одновременно запасена в накопителе (рис. 4).

Распределение потока электрической энергии на привод и хранение происходит за счет параллельного включения инвертора тяги и реверсивного конвертора, обеспечивающего двустороннее протекание тока. Реализовать это возможно с помощью специальной системы управления, которая исключит приток энергии от контактной сети к накопителю при рекуперации и ее отток от накопителя в контактную сеть в режиме тяги. Требуемый эффект может быть достигнут за счет динамического изменения пороговых значений напряжений инвертора тяги и прерывателя, а также предельных значений тока контактной сети [15]. Подобный принцип дает возможность рационально перераспределять потоки энергии как внутри системы тягового привода отдельного поезда в зависимости от места его нахождения относительно тяговых подстанций, так и при выбеге или торможении других поездов, находящихся на этой зоне.

Процесс обмена энергией

Процесс обмена энергией между накопителем и тяговыми двигателями для принятого нами подвижного состава будем

Таблица 3. Параметры асинхронного тягового двигателя

Режим	P, кВт	U _л , В	I _ф , А	n, об/мин	f, Гц	cosφ	КПД	S, %	M, кН·м	F, кН
Часовой	430	1400	216	1075	54,5	0,86	0,95	1,29	3,82	75,7
Продолжительный	430	1638	176	1745	88,2	0,889	0,957	0,94	2,35	46,7

моделировать, базируясь на 6-полюсные асинхронные двигатели, параметры которых приведены в табл. 3 и на рис. 5.

Тяговая тормозная характеристики, а также характеристики сопротивления движению на площадке, рассчитанные для нашего поезда, приведены на рис. 6.

Расчет удельной силы сопротивления движению произведен согласно [16]:

$$f_w = \frac{A + Bv_{ps} + C(v_{ps})^2}{m_{ps}},$$

где коэффициенты для поездов рассматриваемого класса приняты следующими: A = 23 Н/т, B = 48,2 Н·с/м, C = 6,48 Н·(с/м)².

Для того чтобы энергия торможения электропоезда была сохранена вне зависимости от условий взаимодействия с контактной сетью, а затем с максимальной степенью эффективности была использована при разгоне, необходим накопитель с энергией обмена 12 МДж. Система его электро-

механического преобразования энергии должна обеспечить в процессе торможения электропоезда переток мощности от тяговых двигателей к накопителю и наоборот в процессе разгона — от накопителя к двигателям на уровне 500 кВт.

Указанные характеристики может обеспечить накопитель, параметры которого приведены в табл. 4.

Определение эффективности работы тягового привода с накопителем энергии произведем для варианта схемы, когда контактная сеть не принимает участия в процессах обмена энергией между накопителем и тяговыми двигателями — ключи К1 и К3 разомкнуты (рис. 2). В качестве допущения принимаем, что напряжение и ток на входе в АИН и конвертор — суть одни и те же величины. В таком случае математические модели процессов обмена энергией во времени для режима торможения и разгона ЭПС можно представить в виде двух систем дифференциальных уравнений, содержащих по три уравнения. Первое уравнение устанавливает закономерность протекания электромагнитных процессов в двигателе и СЭМПЭ накопителя, два других — электромеханические уравнения движения ЭПС и частоты вращения ротора накопителя.

Следует учесть, что в режиме торможения производные скорости поезда и частоты вращения ротора накопителя имеют знак «-» и «+», соответственно. Для режима разгона характерно обратное.

Результаты расчетов основных показателей, характеризующих работу тягового привода с накопителем энергии в различных режимах работы электропоезда, показаны на рис. 7.

Анализ приведенных зависимостей показал, что переток мощности от тягового привода к накопителю (торможение ЭПС) происходит в течение 25 с, причем мощность «на колесе» изменяется в от 570 до 230 кВт, а электрическая мощность накопителя — от 50 до 540 кВт. Поезд начинает торможение с 40 км/ч и по истечении вышеуказанного времени его скорость падает до 18 км/ч. Частота вращения ротора накопителя возрастает от 52 до 845 об/с. При этом ток в цепи изменяется в диапазоне 950–730 А. Во время движения энергия поезда уменьшается от 12 до 1,2 МДж, а накопителя — возрастает от 0,03 до 7,6 МДж.

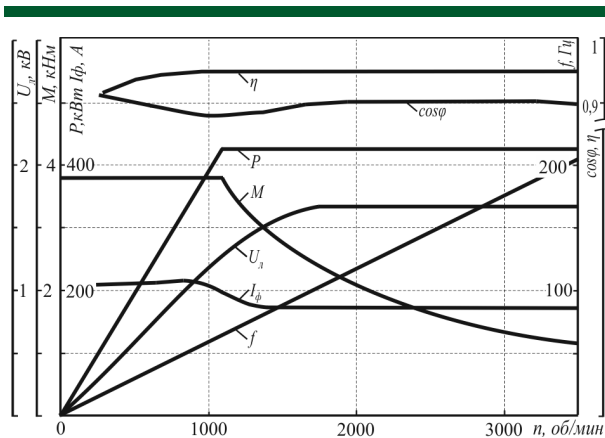


Рис. 5. Рабочие характеристики тягового асинхронного двигателя: P — мощность; M — момент на валу; U_л — напряжение линейное; I_ф — ток фазный; f — частота питающего напряжения; η — КПД; cosφ — коэффициент мощности

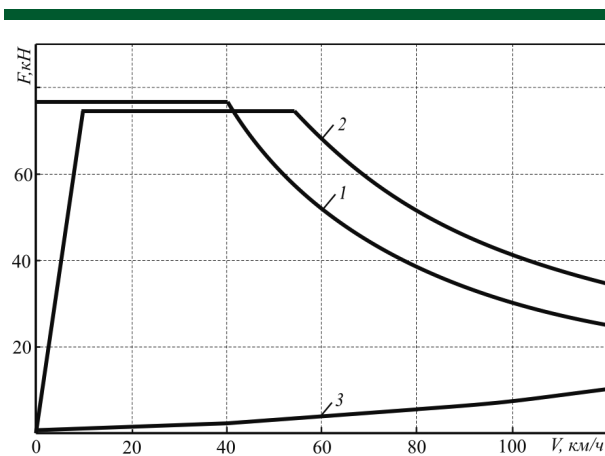


Рис. 6. Характеристики поезда: 1 — тяговая; 2 — тормозная; 3 — сопротивления движению

Таблица 4. Параметры накопителя

Габаритные размеры (д × ш), мм	900 × 650
Мощность, кВт	500
Напряжение номинальное, В	1000
Ток номинальный, А	500
Маховик:	
материал	углепластик
размеры, мм: д внш. × д внутр. × в	700 × 440 × 400
масса, кг	250
момент инерции, кг/м ²	21,5
число оборотов, 1/мин: max...min	10000-500
энергия обмена, МДж	12
Якорь:	
число полюсов	2
полюсное деление, мм	340
число фаз	4
число катушек в фазе	4
число витков в катушке	4
поперечное сеч. проводника, мм ²	50
Индуктор:	
размеры магнита д × в × т, мм	340 × 300 × 15
индукция в активной зоне, Тл	0,22
зазор, мм	3

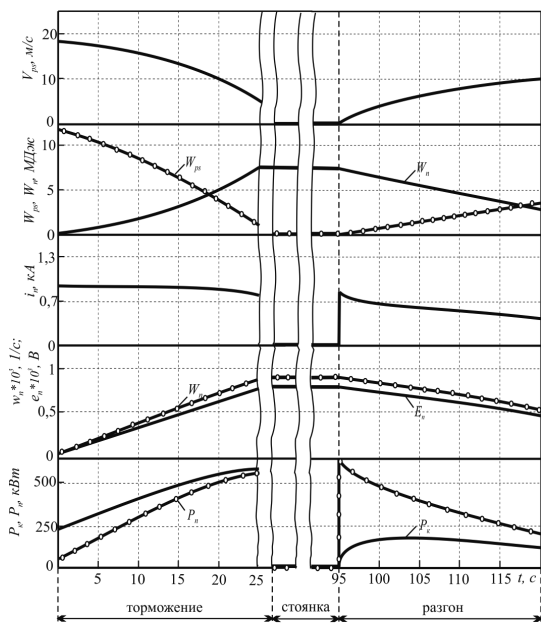


Рис. 7. Процессы обмена энергией между ЭПС и накопителем: $V_{пс}$ — скорость подвижного состава; $W_{пс}$ — энергия подвижного состава; W_n — энергия накопителя; i_n — ток в системе накопитель-двигатель; W_n — энергия накопителя; E_n — ЭДС накопителя; P_k — мощность «на колесе»; P_n — мощность накопителя

Эффективность этого процесса может быть оценена с помощью коэффициента рекуперации:

$$K_p = \frac{W_{н1}}{W_{пс1}}$$

где $W_{н1}$ — энергия, запасенная накопителем; $W_{пс1}$ — энергия, выделившаяся при торможении поезда.

В нашем случае $K_p = 0,6$.

Ввиду того что время стоянки невелико (порядка 60 с), принимаем, что при пуске ЭПС накопитель будет обладать энергией, которая была им запасена при торможении.

При перетоке мощности от накопителя к тяговому приводу (разгон ЭПС) в течение 25 с мощность «на колесе» изменится в диапазоне 0,1–170 кВт, а электрическая мощность накопителя — в диапазоне 600–190 кВт. Поезд разгоняется от 0 до 36 км/ч. Частота вращения накопителя снижается до 525 об/с. При этом ток в цепи изменяется в диапазоне 800–400 А. При разгоне энергия поезда возрастает до 3,5 МДж, а накопитель по истечении указанного времени еще обладает энергией 3 МДж.

Эффективность работы накопителя при разгоне ЭПС может быть оценена с помощью коэффициента использования

$$K_{и} = \frac{W_{н2}}{W_{пс2}}$$

где $W_{н2}$ — энергия, затраченная на разгон поезда; $W_{пс2}$ — энергия, необходимая для разгона поезда до заданной скорости.

В нашем случае $K_{и} = 0,34$.

В качестве критерия интегральной оценки эффективности применения на электропоездах пригородного сообщения схемы тягового электропривода с накопителем энергии принимаем критерий эффективности накопителя K_3 .

$$K_3 = K_p \times K_{и}$$

В нашем случае коэффициент эффективности накопителя энергии для предлагаемого поезда равен 0,2.

Таким образом, в рассмотренном нами примере накопитель утилизирует порядка 60% энергии торможения ЭПС. До 34% этой энергии используется повторно при разгоне поезда. В итоге на каждом цикле «торможение — стоянка — разгон» экономится до 20% энергии.

Эта цифра может быть существенно больше, если повысить коэффициент использования Ки. Резервом для этого является определение оптимального закона управления процессом перетока энергии от накопителя к двигателям при заданном характере изменения мощности последних. Поиск такого закона в рассматриваемой схеме имеет возможность вести в двух направлениях:

- определения наилучшей траектории изменения ЭДС СЭМПЭ накопителя в функции оборотов его ротора, благодаря возможности изменения в широких пределах числа фаз обмотки якоря и угла нагрузки;
- определение рациональной динамики изменения коэффициента регулирования конвертора.

Выводы

Таким образом, предложен концептуальный проект электропоезда пригородного сообщения, параметры и характеристики которого находятся на уровне передовых технических решений в области создания подвижного состава железных дорог Европы. Показано, что применение в системе тягового электропривода такого поезда инерционного накопителя энергии позволяет: во-первых, обеспечивать рекуперативное торможение практически до нулевой скорости, исключив его зависимость от процессов, происходящих в контактной сети, во-вторых, использовать утилизируемую при торможении энергию для разгона электропоезда после его останова. Эти обстоятельства говорят о том, что электропоезда, использующие предложенную систему тягового электропривода, могут стать эффективным средством энергосбережения для электрических железных дорог.

Локомотив

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A. Brüggemann. Der elektrische Zug einer Serie 422. — ZEVrail. — 2009. — № 3. S. 84–99.
2. J. Simon. Der elektrische Zug einer Serie 425 für die regionalen Beförderungen. — Deine Bahn. — 2002. — № 8. — S. 494–499.
3. H. Hondius. Electric train of Talent 2 of the Bombardier company // Railway Gazette International. — 2009. — № 2. — P. 38–41.
4. Talent ЦВВ — моторвагонные поезда нового поколения // ЖДМ. — 2009. — № 2. — С. 28–56.
5. A. Vogel. NS-Sprinter Lighttrain — Gliedertriebzüge für die Randstad — Region // Elektrische Bahnen. — 2008. — № 7. — S. 295–303.
6. F. Sehaad, K. Schmidt. Electric train of Flirt of a broad gage // Railvolution. — 2008. — № 6. — P. 22–25.
7. M. Wiegleb. Die elektrische Züge Flirt für die Eisenbahnen Algeriens // Eisenbahn-Revue. — 2009. — № 5. — S. 232–238.
8. S. Zapletal. Polish electric train of new generation // Railvolution. — 2008. — № 6. — P. 62–66.
9. M. Hughes. Local train of the new concept // Railway Gazette International, 2007. — № 9. — P. 574.
10. Распоряжение ОАО «РЖД» об утверждении типов и основных характеристик моторвагонного подвижного состава [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.lawmix.ru/expertlaw/43358. — Название с экрана.
11. Y. Hu, J. Tatler, Z. Chen. A bi-directional dc/dc power electronic converter for an energy storage device in an autonomous power system // IPEMC. — 2004. Vol. 1. — P. 171–176.
12. Омеляненко, В. И. Инерционный накопитель энергии для систем тягового электроснабжения / В. И. Омеляненко, Г. В. Омеляненко // Техническая электродинамика. 2002. — № 4. — С. 83–88.
13. N. Maruyama. Stabilisierung der Fahrleitungsspannung mittels Schwungrad // Elektrische Bahnen. — 1992 (90). — № 4. — P. 125–129.
14. G. Reiner. Energetisches Betriebsverhalten eines permanenterregten Drehmassenspeichers in Theorie und Praxis // VDI-Bericht Nr. — 1168. — 1994.
15. O. Masamichi. Power Flow Control for Hybrid Electric Vehicles Using Trolley Power and On-board Batteries // QR of RTRI. Vol. 48. — № 1. — 2007. — P. 30–36.
16. D. Wende. Fahrtdynamik des Scheinverkehrs // Teubner, Wiesbaden. — 2003. — P. 309.

Материал получен 16.10.2013