УДК 621.355:625.42

Аккумуляторные накопители энергии на метропоездах

Андрей КОВАЛЕНКО
Andrey V.KOVALENKO

Елена ЛОГИНОВА
Elena Yu.LOGINOVA

Логинова Елена Юрьевна *– доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*
Коваленко Андрей Викторович *– аспирант кафедры «Электрическая тяга» МИИТ, Москва, Россия.*

Рассмотрен вариант использования на поездах метро аккумуляторных накопителей энергии. Произведен сравнительный анализ показателей энергетической эффективности поезда со штатной энергосистемой и системой, оборудованной аккумуляторными накопителями. Подтверждена целесообразность применения бортовых систем накопления энергии на подвижном составе метрополитена. Разработана математическая модель энергетической цепи вагона с асинхронными двигателями для исследования тяговых и энергетических характеристик подвижного состава в тяговом и тормозном режимах.

Ключевые слова: метропоезд, энергия рекуперации, система накопления энергии, математическая модель энергетической цепи вагона, тяговый режим, торможение.

Длительный опыт эксплуатации подвижного состава с электрической передачей показал эффективность системы электрического торможения, когда тяговый электродвигатель работает в режиме генератора. Поскольку тяговый двигатель связан с осью колесной пары моторного вагона через тяговый редуктор, вращение колеса под действием сил инерции поезда приводит во вращение ротор двигателя даже при отсутствии напряжения на его фазах. При соответствующем алгоритме управления напряжением двигатель переводиться в генераторный режим, а на его статорной обмотке образуется система трехфазного переменного напряжения.

Сейчас подвижной состав метрополитена оборудуется системами рекуперативного торможения, позволяющими передавать энергию торможения поезда в сеть. Однако для эффективного использования этой энергии в пределах фидерного участка должны находиться поезда, работающие в режиме тяги, что далеко не всегда соответствует условиям эксплуатации, и получается, что метропоезд готов передать выработанную электроэнергию в сеть, а применить эту энергию на тягу не удается. Кроме того,

Таблица 1/Table 1

Основные технические параметры аккумуляторного накопителя
Technical features of accumulating battery storage unit

№ п/п	Параметр	Parameter	Значение/Value
1	Количество батарейных модулей 16ПЛИА-40, шт.	Number of battery modules 16PLIA-40, units	13
2	Энергоемкость, кВт•ч	Energy storage capacity, KW•h	31
3	КПД цикла заряд/разряд, не менее	Efficiency ratio of a cycle charge/discharge, not less than	0,9
4	Предельный ток разряда (до 30 сек), А	Limiting current of discharge (up to 30 sec), A	600
5	Номинальное напряжение, В	Working voltage, V	780
6	Максимальный ток разряда, А – до 30 сек – длительно	Maximum current of charge, A – up to 30 sec – for a long period	600 400
7	Максимальный ток заряда (до 30 сек), А	Maximum current of charge (up to 30 sec), A	200
8	Масса, кг – батарейного модуля – батареи	Weight, kg – battery module – whole battery	43 600

неравномерная загрузка линий энергоснабжения метрополитена не всегда позволяет эффективно использовать энергию, рекуперируемую в сеть подвижным составом. Альтернативой системы рекуперации является применение на моторных вагонах аккумуляторных накопителей энергии.

Учитывая опыт эксплуатации и существующие разработки систем накопления энергии, наиболее рациональным вариантом представляется установка на метровагонах бортовых накопителей. Назначение таких устройств – аккумулирование электроэнергии, генерируемой тяговым оборудованием при торможении подвижного состава. Причем она может им же эффективно использоваться на режимах тяги независимо от иных функций энергосети метрополитена. Как результат будет иметь место снижение энергопотребления на тягу и сокращение потерь энергии на рекуперацию.

Одновременно энергетическая цепь метрополитена освобождается от перегрузок, которые могут возникать при рекуперации электроэнергии поездами метро в часы пик, что является еще одним аргументом в пользу применения на каждом поезде собственной системы аккумулирования энергии.

В унисон этому специально для подвижного состава разрабатываются накопители на основе полимерных литий-ионных аккумуляторов (ПЛИА), технические характеристики которых приведены в таблице 1 [1].

С целью сопоставления затрат энергии метропоездом со штатной энергетической системой и энергетической системой, оборудованной аккумуляторными накопителями энергии, было выполнено моделирование режимов движения штатного и опытного поездов на участке длиной 3000 м, разбитом на три однотипных отрезка по 1000 м с уклонами 0‰.

Моделирование выполнялось для поезда, состоящего из пяти шестиосных моторных вагонов типа 81–740/741 с массой тары 46 т каждый и электрической передачей переменного тока. Крайние тележки вагона оборудованы тяговыми асинхронными двигателями (ТАД) типа ДАТЭ2–170–4У2 (таблица 2). Привод движущей оси – индивидуальный.

При моделировании принималась максимальная загрузка каждого вагона 26 т. В результате нагрузка на ось составляла 12 т.

В модели энергетическая цепь метровагона представлена преобразователем напряжения, тяговыми асинхронными двигателями, аккумуляторным накопителем энергии (рис. 1). Для регулирования параметров режима эксплуатации энергетического оборудования использовался алгоритм оптимального управления ТАД по экстремумам П-образных характеристик (работа двигателей с максимальным КПД). Коэф-

Таблица 2/Table 2

Параметры номинального режима работы двигателя ДАТЭ2–170–4У2
Parameters of nominal operation of the engine DATE2–170–4U2

№ п/п	Параметр	Parameter	Значение/Value
1	Мощность на валу, кВт	Shaft power, KW	170
2	Напряжение линейное, В	Line-to-line voltage, V	530
3	Частота питающего напряжения, Гц	Feeding voltage frequency, Hz	43,4
4	Ток фазный, А	Phase current, A	225
5	Относительное скольжение,%	Relative slip,%	1,39
6	Коэффициент мощности	Electrical power factor	0,85
7	КПД,%	Efficiency ratio,%	92
8	Частота вращения ротора, об/мин	Rotary speed, RPM	1290
9	Момент на валу, Н·м	Shaft torque, N * M	1260

$$
\begin{cases}
f_1 = \dfrac{f_P}{1-s}; \\
I_2^{`} = \dfrac{U_1}{Z}; \\
Z = \sqrt{\left[\left(r_1 + \dfrac{r^{`}_2}{s}\right)^2 + \left(x_1 + x^{`}_2\right)^2\right]}; \\
I_0 = \sqrt{{I_{0a}}^2 + {I_{0p}}^2}; \\
I_{0p} \approx I_\mu; \\
I_{0a} \approx \dfrac{\Delta P_{CT1} + m_1 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1 + \Delta P_{MEX}}{m_1 \cdot U_1}; \\
\cos\phi^{`}_2 = \dfrac{R}{Z}; \\
I_{1a} = I_{0a} + I_2^{`} \cdot \cos\phi^{`}_2; \\
I_{1p} = I_{0p} + I_2^{`} \cdot \sin\phi^{`}_2; \\
I_1 = \sqrt{{I_{1a}}^2 + {I_{1p}}^2}; \\
P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_{1a}; \\
P_{ЭМ} = \dfrac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r^{`}_2}{s \cdot \left[\left(r_1 + \dfrac{r^{`}_2}{s}\right)^2 + \left(x_1 + x^{`}_2\right)^2\right]}; \\
P_2 = P_{ЭМ} - \Delta P_{ЭЛ2} - \Delta P_{CT2} - \Delta P_{CT2}^{ДОБ} - \Delta P_{MEX} - \Delta P_{ДОБ}^{НАГР}; \\
M_2 = \dfrac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot n_p},
\end{cases}
\qquad (1)
$$

фициент полезного действия системы рекуперации энергии торможения определялся как отношение энергии, возвращаемой в сеть при условии ее полного использования, к общей энергии, затрачиваемой на движение.

В основу модели энергетической системы моторного вагона положены уравнения электромеханического состояния ТАД, работающего от системы энергоснабжения метрополитена. В тяговом режиме модель двигателя описывается следующей системой уравнений (1), где f_1, U_1 – значения частоты и амплитуды фазного напряжения, формируемые системой управления АТД; f_P – механическая частота вращения ротора; s – относительное скольжение ротора; I_1, I_{1a}, I_{1p}, – ток обмотки статора и его активная и реактивная составляющие; I_0, I_{0a}, I_{0p} – ток холостого хода, его активная и реактивная составляющие; I_μ – ток намагничивания; m_1 – число фаз обмотки статора; P_1 – активная составляющая электрической мощности двигателя; $P_{ЭМ}$ – электромагнитная мощность; n_p – механическая

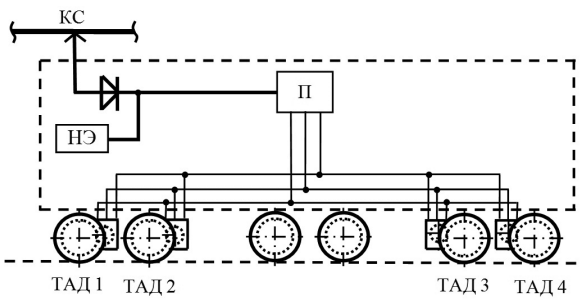


Рис. 1. Принципиальная схема энергетической цепи моторного вагона с накопителем электроэнергии: КС – контактная сеть; П – преобразователь напряжения; ТАД 1–4 – тяговые асинхронные двигатели; НЭ – аккумуляторный накопитель энергии.

Pic. 1. Principal layout of power circuit of a motor car with electric power storage device: КС – contact network, П – voltage transformer, TAD 1–4 traction asynchronous engines, НЭ – accumulator battery-based power storage device.

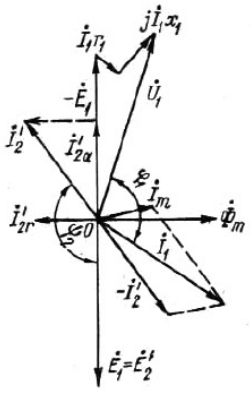


Рис. 2. Векторная диаграмма асинхронной машины в генераторном режиме работы.

Pic.2. Vectogram of asynchronous machine in generator mode.

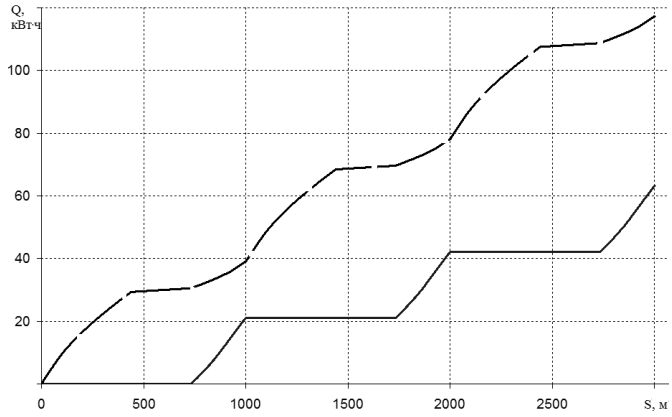


Рис. 3. Затрачиваемая и возвращаемая энергии при движении поезда метро со штатной энергетической системой вагонов: — — — — – потребляемая из сети энергия; ——— – рекуперируемая энергия.

Pic.3. Consumed and regenerated power during the traction of a Metro coach with standard power system: — — — — – power consumed from within the network; ——— – regenerated power.

частота вращения ротора; R, Z – активное и полное сопротивления цепи намагничивания; r_1, x_1 – активное и реактивное сопротивления фазы обмотки статора; $r`_2$, $x`_2$ – приведенные значения активного и реактивного сопротивления фазы обмотки ротора; $\Delta P_{ЭЛ}$, $\Delta P_{СТ}$, $\Delta P_{МЕХ}$, $\Delta P_{СТ}^{ДОБ}$, $\Delta P_{ДОБ}^{НАГР}$, – потери мощности двигателя: электрические, в стали, добавочные в стали, добавочные при нагрузке, механические; P_2 – механическая мощность двигателя; M_2 – механический момент двигателя.

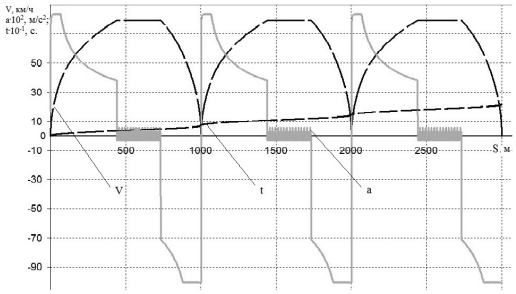
При переходе в режим торможения модель меняется; в этом случае наряду с контактной сетью источником для работы энергетической цепи вагона является кинетическая энергия движения поезда. В результате модель двигателя базировалась на методике расчета характеристик асинхронной машины в генераторном режиме [2] с использованием векторной диаграммы (рис. 2) (2), где E_1 – ЭДС, наведенная в фазе обмотки статора; $\phi`_2$, $\theta$, $\phi`_E$, ϕ_E, ϕ_U, ϕ_1 – углы ориентации векторов токов, напряжения и ЭДС на векторной диаграмме асинхронного двигателя в генераторном режиме работы.

Результаты моделирования движения поезда со штатной энергетической системой вагонов показали, что общие затраты энергии на участке 3000 м достигают 117,3 кВт•ч,

$$
\begin{cases}
f_1 = \dfrac{f_P}{1+s}; \\
z_2^{`} = \sqrt{r`_2{}^2 + x`_2{}^2}; \\
I_2^{'} = \dfrac{E_1}{z_2^{`}}; \\
\phi`_2 = \arctan\left(-\dfrac{s \cdot x`_2}{r`_2}\right); \\
\theta = \arcsin\left(\dfrac{\Delta P_{CT1} + m_1 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1 + \Delta P_{MEX}}{m_1 \cdot E_i \cdot I_0}\right); \\
\phi`_E = \arctan\left(\dfrac{I_0 + I_2^{'} \cdot \sin(\phi`_2 - \theta)}{I_2^{'} \cdot \cos(\phi`_2 - \theta)}\right); \\
\phi_E = \phi`_E + \theta; \\
I_1 = I_2^{'} \cdot \dfrac{\cos(\phi`_2 - \theta)}{\cos(\phi`_E)}; \\
\phi_U = \arctan\left(\dfrac{I_1 \cdot (x_1 \cdot \cos\phi_E + r_1 \cdot \sin\phi_E)}{E_i + I_1 \cdot (x_1 \cdot \sin\phi_E - r_1 \cdot \cos\phi_E)}\right); \\
U_1 = \dfrac{I_1 \cdot (x_1 \cdot \cos\phi_E + r_1 \cdot \sin\phi_E)}{\sin\phi_U}; \\
\phi_1 = \pi - (\phi_E + \phi_U); \\
P_2 = 3 \cdot E_i \cdot I_2^{'} \cdot \cos(\pi - \phi`_2); \\
P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1; \\
M_2 = \dfrac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot n_p},
\end{cases}
\qquad (2)
$$

Рис. 4. Кинематические характеристики движения поезда метро со штатной энергетической системой вагонов: V – скорость движения; a – ускорение движения; t – время хода.

Pic.4. Kinematics features of movement of Metro coach equipped with standard power system.



а возвращаемая в сеть энергия на режимах рекуперации – 63,1 кВт•ч (рис. 3). Затраты энергии на движение поезда в пределах заданного участка при полном использовании рекуперируемой энергии составят 54,2 кВт•ч.

Кинематические характеристики движения такого поезда представлены на рис. 4. Из них следует, что общее время его хода по участку с тремя последовательными режимами «разгон – движение с постоянной скоростью – торможение» 216 с, а средняя скорость движения поезда – 50,1 км/ч.

Анализ полученных результатов показал, что максимальные затраты энергии имеют место при разгоне и торможении поезда. На режиме трогания и последующего разгона (участки: 0–440 м, 1000–1440 м, 2000–2440 м) затраты энергии на тягу в пределах одного перегона составили 30,5 кВт•ч при общих затратах энергии на движение – 39,1 кВт•ч (рис. 3). Такое высокое энергопотребление на режиме «трогание – разгон» объясняется необходимостью обеспечить в соответствии с техническими требованиями к новым вагонам метрополитена [3] ускорение поезда 1,0 м/с^2 при плавности хода – 0,6 м/с^3. Однако в случае ограничения токовой нагрузки двигателей номинальным значением можно получить максимальное ускорение в момент трогания – 0,84 м/с^2 при требуемой плавности хода 0,6 м/с^3 (рис. 4).

В процессе разгона ускорение поезда снижается до 0,44 м/с^2, и когда скорость достигает 80 км/ч, энергетическая система вагонов переходит на режим поддержания скорости (участки: 440–730 м, 1440–1730 м и 2440–2730 м) (рис. 3,4).

Момент перевода энергетической системы в тормозной режим определялся требованием остановить поезд на станции. Результаты моделирования показали: чтобы обеспечить это требование в диапазоне скоростей 7 км/ч < V ≤ 80 км/ч может использоваться система рекуперативного торможения. Таким режимам соответствуют участки пути 730–995 м, 1730–1995 м, 2730–2995 м (рис. 3, 4). Затраты энергии поездом за один режим рекуперативного торможения не превышают 8,6 кВт•ч, при этом моделью предполагалось, что сеть способна полностью принять рекуперируемую энергию. Согласно с [3] на режиме торможения максимальное замедление поезда составляло 1,0 м/с^2 при плавности хода 0,6 м/с^3 (рис. 4). Скорость ниже 7 км/ч предусматривает переход на систему пневматического торможения (участки 995–1000 м и т. д.), а останавливается поезд колодочным тормозом.

Анализ энергетических показателей движения поезда позволил установить, что при полном приеме рекуперируемой им энергии другими поездами, находящимися в пределах того же фидерного участка, коэффициент полезного действия системы рекуперации подконтрольного поезда составит 54%.

Начальным условием при моделировании режима движения поезда с бортовой накопительной энергосистемой являлось разряженное состояние аккумуляторов: в момент подготовки движения (t=0) было принято, что накопительная система имела минимальную емкость – 186 кВт•ч, значение которой при торможении увеличивалось до 207 кВт•ч. Разряд накопителей в тяге выполнялся до исходной емкости. Вся работа системы аккумулирования энергии торможения осуществлялась на участках 630–995 м, 1620–1995 м, 2620–2995 м – заряд и 1000–1280 м и т. д. – разряд (рис. 5).

Расчеты показали, что применение аккумуляторных накопителей в энергетической системе поезда сокращает расход энергии на тягу до 77,2 кВт•ч, то есть на 34% меньше, чем в штатной системе (рис. 5). Однако для этого необходимо оборудовать моторный вагон четырьмя аккумуляторными накопителями, каждый из которых состоит из 13 бата-

рейных модулей 16ПЛИА (см. таблицу 1); как получено при численном исследовании, такое количество накопителей необходимо иметь для предотвращения их перегрузок на режимах «заряд-разряд». Предлагаемая модернизация энергетической системы поезда позволит принимать максимум энергии одного режима торможения, а на режимах тяги разряжать накопители до минимально допустимого значения емкости (30% от номинала).

Важно иметь в виду, что при установке на поезд накопительной системы его сцепной вес увеличивается на 12 т. Вследствие этого получаются несколько худшие кинематические характеристики движения на участке 3000 м: средняя скорость поезда составила 48,4 км/ч; время хода – 223 с. Это объясняется тем, что при моделировании принимались одинаковые тяговые двигатели для поезда без накопительной системы и поезда с накопительной системой. Поэтому в обоих вариантах моделирования использовались одинаковые ограничения нагрузок тяговых машин. Очевидно, чтобы получить требуемые кинематические характеристики модернизированного поезда, мощность его энергетического оборудования должна быть увеличена.

Стоит отметить, что при анализе эффективности использования аккумуляторной накопительной системы электроэнергии для достаточно большого количества циклов разряд-заряд необходимо учитывать уменьшение как КПД системы, так и основных ее параметров. Три одинаковых участка моделирования движения были выбраны с целью показать, что при четком выполнении графика и организации на одной фидерной зоне синхронно-параллельных режимов работы «тяга-торможение» потребность в установке на метровагоны накопительных систем отпадает, поскольку результирующие затраты энергии при штатной системе составляют 54,2 кВт•ч, а модернизированной – 77,2 кВт•ч.

Однако, как свидетельствует опыт эксплуатации метропоездов, добиться режима полной рекуперации энергии торможения невозможно, а передача свободной энергии рекуперации на тяговые подстанции при существующей системе энергоснабжения метрополитена реализована быть не может [4, 5]. Поэтому альтернативой режимам реостатного торможения поездов является

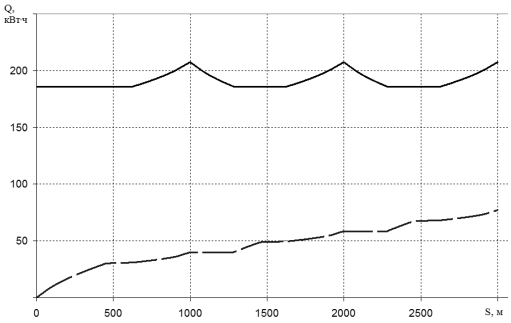


Рис. 5. Результаты моделирования движения поезда с бортовой системой накопления энергии: — — — – потребляемая из сети энергия; ——— – энергия в накопительной системе.

Pic.5. Results of simulation of moving of a train equipped with on-board power cumulating system: — — — – power consumed from within a network; ——— – power in cumulating system.

использование бортовых накопительных систем. Для условий тяговой работы подвижного состава перспективным направлением следует считать аккумуляторные накопители, способные отдавать накопленную энергию практически в течение всего процесса разгона.

Проведенные расчеты показали, что при торможении поезда со скорости 80 км/ч до 7 км/ч энергии, запасенной аккумуляторами, достаточно для его последующего разгона до скорости 67 км/ч за время 28 с, тогда как в соответствии с [4] конденсаторные накопительные системы дают возможность разогнать поезд только до 30 км/ч, используя всю энергию, запасенную при торможении с 70 км/ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ганзбург М. Ф., Груздев А. И., Трофименко В. И. Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах// Материалы XI междунар. конф./Под. ред. М. С. Плешакова. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010. – С. 289–293.

2. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями/ Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Г. Быков, В. В. Литовченко; Под ред. Н. А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.

3. Вагоны метрополитена. Общие технические условия. ГОСТ Р 50850–96 (с изменениями от 1.03.2011). М.: Госстандарт России, 2011. – 24 с. По: [Электронный ресурс] http://vsegost.com/Catalog/18/18746.shtml. Доступ 24.01.2014.

4. Стрельцов А. Эффект торможения // Гудок. – 2011. – 27 декабря. [Электронный ресурс] http://www.gudok.ru/newspaper/? ID=694744. Доступ 24.01.2014.

5. Использование ионистров для рекуперативного торможения в метрополитене. По [электронный ресурс]: http://habrahabr.ru/post/166387/. Доступ 24.01.2014.