

УДК [621.333.4 + 519.254] : 629.(431+432)

А. А. Сулим
А. И. Ломонос

РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ ПРИ УСТАНОВКЕ НАКОПИТЕЛЯ НА ЭЛЕКТРОПОЕЗДЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

В статье разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать количество и стоимость потребляемой, рекуперированной в накопитель и избыточной электроэнергии с учетом режима движения поезда метрополитена. Выполнен расчет электроэнергии, а также необходимой емкости накопителя с применением разработанного алгоритма.

В статті розроблений алгоритм, що дозволяє розрахувати кількість і вартість споживаної, рекуперованої в накопичувач і надлишкової електроенергії з урахуванням режиму руху поїзда метрополітену. Виконано розрахунок електроенергії, а також необхідної ємності накопичувача із застосуванням розробленого алгоритму.

The paper developed an algorithm that count the number and value of consumption, recuperated in the drive and excess electricity based on a mode of movement of underground trains. The calculation of electricity, as well as the necessary storage capacity using the developed algorithm.

Ключевые слова: электропоезд метрополитена, режим рекуперации, емкостный накопитель энергии.

Проблема энергосбережения на электропоездах метрополитена является очень актуальной [1, 2]. Одним из перспективных направлений по повышению энергоэффективности электропоездов метрополитена является применение рекуперативного торможения [2–6]. По некоторым данным применение рекуперативного торможения позволит экономить около 5–30 % электроэнергии, расходуемой на тягу [2–6]. Еще одним вопросом, связанным с эффективностью применения рекуперации, является проблема использования избыточной энергии рекуперации в те интервалы времени, когда на линии отсутствуют потребители. Проблему использования избыточной энергии рекуперации можно решить установкой накопителя энергии (в частности емкостного накопителя) в системе энергообеспечения электропоезда метрополитена [2–4]. Выбор емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) обусловлен рядом преимуществ его характеристик по сравнению с другими видами накопителей энергии [2, 4, 7]. Этот вид накопителя также удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к устройствам накопления энергии для систем электрической тяги [8].

© Сулим А. А., Ломонос А. И., 2013

Таким образом, применение ЕНЭ позволит дополнительно использовать избыточную электроэнергию рекуперации поезда метрополитена. Наиболее перспективным с точки зрения эффективности процессов энергообмена является установка ЕНЭ на поезде метрополитена [9]. Основной особенностью этого размещения накопителя является накопление энергии на борту электропоезда и ее использование электропоездом в режиме тяги. Таким образом, расчет должен учитывать данные особенности и позволять определять следующие показатели: энергию потребления (без накопителя и при его наличии), энергию накопления и избыточную энергию.

Проведенный анализ показал, что в работах других авторов не предложены методики расчета накапливаемой и рекуперированной энергии при установке накопителя на электропоезде метрополитена [6].

Цель работы состоит в разработке методики расчета количества и стоимости потребляемой, рекуперированной в накопитель и избыточной энергии, исходя из заданного режима движения поезда метрополитена.

В основе методики расчета лежат вычисления потребляемой, рекуперированной и накапливаемой энергии по имеющимся входным данным режима движения электропоезда метрополитена, среднего потребляемого (рекуперированного) тока, среднего напряжения контактной сети, энергоемкости накопителя. Рассчитанные данные для каждого режима ведения поезда записываются в виде столбцов таблицы. Таблица выходных данных состоит из следующих столбцов: энергия потребления без применения накопителя – $A_{\text{потр}}$, энергия потребления с применением накопителя – $A_{\text{потр.нак}}$, накопленная энергия – $A_{\text{нак.рек}}$ и избыточная энергия при рекуперативном торможении – $A_{\text{изб.рек}}$. После заполнения таблицы осуществляются расчеты общей энергии потребления и рекуперации, а также ее стоимости для заданного режима движения электропоезда.

Следует отметить, что данная методика кроме вышеприведенных показателей позволяет рассчитывать необходимую энергоемкость накопителя в случае наличия избыточной энергии рекуперации. Расчет подразумевает наличие на борту электропоезда метрополитена ЕНЭ определенной энергоемкости. Исходным состоянием перед проведением расчетов считается, что накопитель полностью разряжен. Предложенный алгоритм расчета (рис. 1) включает вычисления, суть которых рассмотрена ниже.

Задаются оператором параметры, необходимые для расчета энергии рекуперации при установке накопителя на электропоезде: количество изменения режимов движения поезда (K), энергоемкость установленного накопителя (A), режим движения на линии в виде столбцов таблицы («1», «0», «-1», где «1» – режим тяги, «0» – режим выбега, «-1» – режим рекуперативного торможения), длительность для каждого режима движения электропоезда ($t_{1...K}$), средний ток для каждого режима движения электропоезда ($I_{\text{ср}1...K}$), среднее напряжение на шинах вагона каждого режима движения электропоезда ($U_{\text{ср}1...K}$), стоимость электроэнергии за 1 кВт·час., минимальное напряжение на ЕНЭ ($U_{\text{енmin}}$), максимальное напряжение на ЕНЭ ($U_{\text{енmax}}$).

Рассчитывается энергия потребления в режиме тяги и записывается результат в столбцы $A_{\text{потр}}$ и $A_{\text{потр.нак}}$, в колонках $A_{\text{нак.рек}}$ и $A_{\text{изб.рек}}$ записываются нули. Расчеты количества энергии потребления в режимах тяги и выбега, а также количества энергии рекуперации, выполняются по выражениям:

$$A_{\text{тяги}} = \frac{I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{ср}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot 1000}; \quad (1)$$

$$A_{\text{выбега}} = \frac{I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{ср}} \cdot t_{\text{выбега}}}{3600 \cdot 1000}; \quad (2)$$

$$A_{\text{рек}} = \frac{I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{ср}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000}; \quad (3)$$

где $t_{\text{тяги}}$ – длительность режима тяги; $t_{\text{выбега}}$ – длительность режима выбега; $t_{\text{рек}}$ – длительность режима рекуперативного торможения.

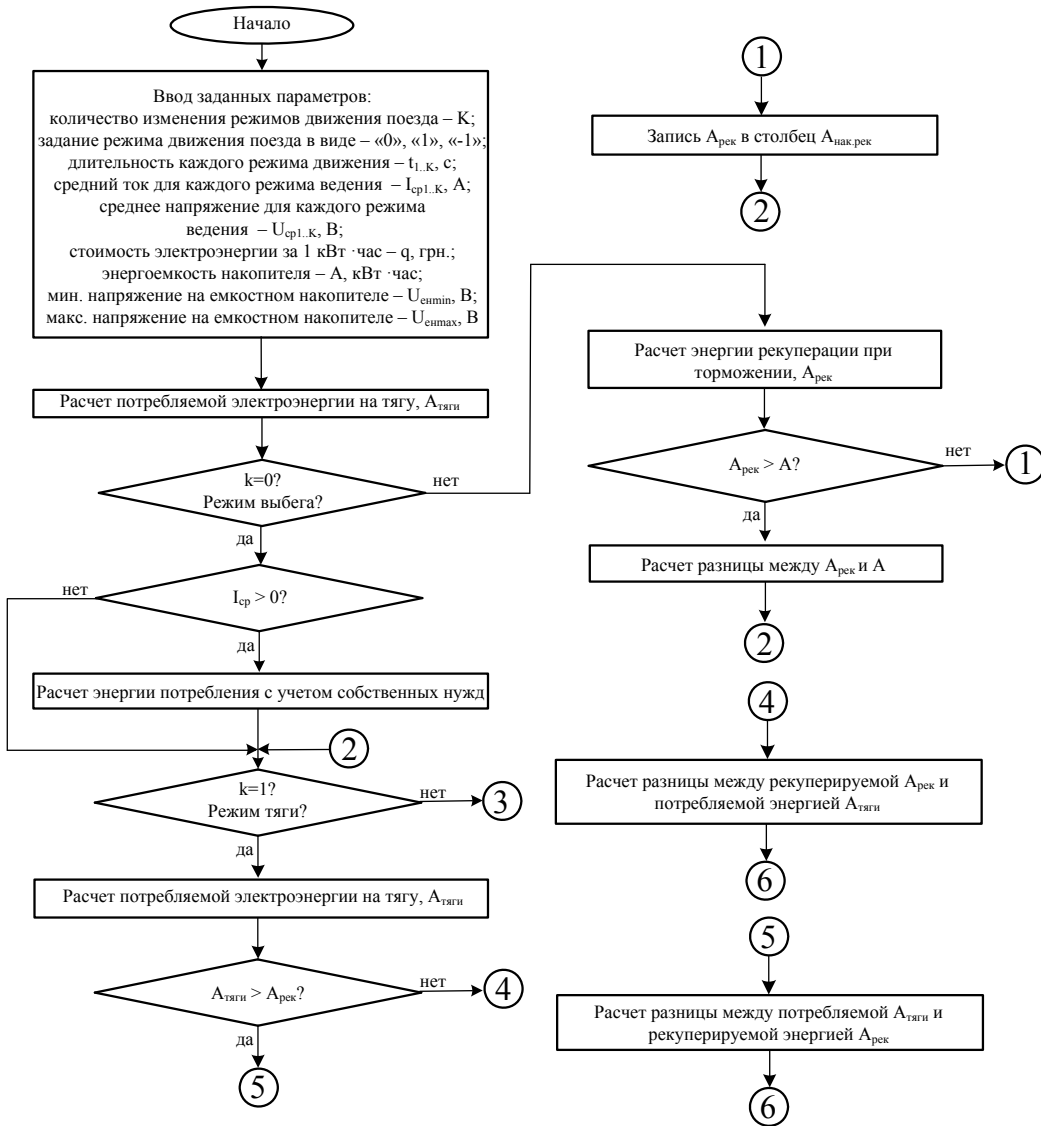


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения количества и стоимости потребляемой, рекуперированной в накопитель и избыточной энергии рекуперации электропоезда метрополитена

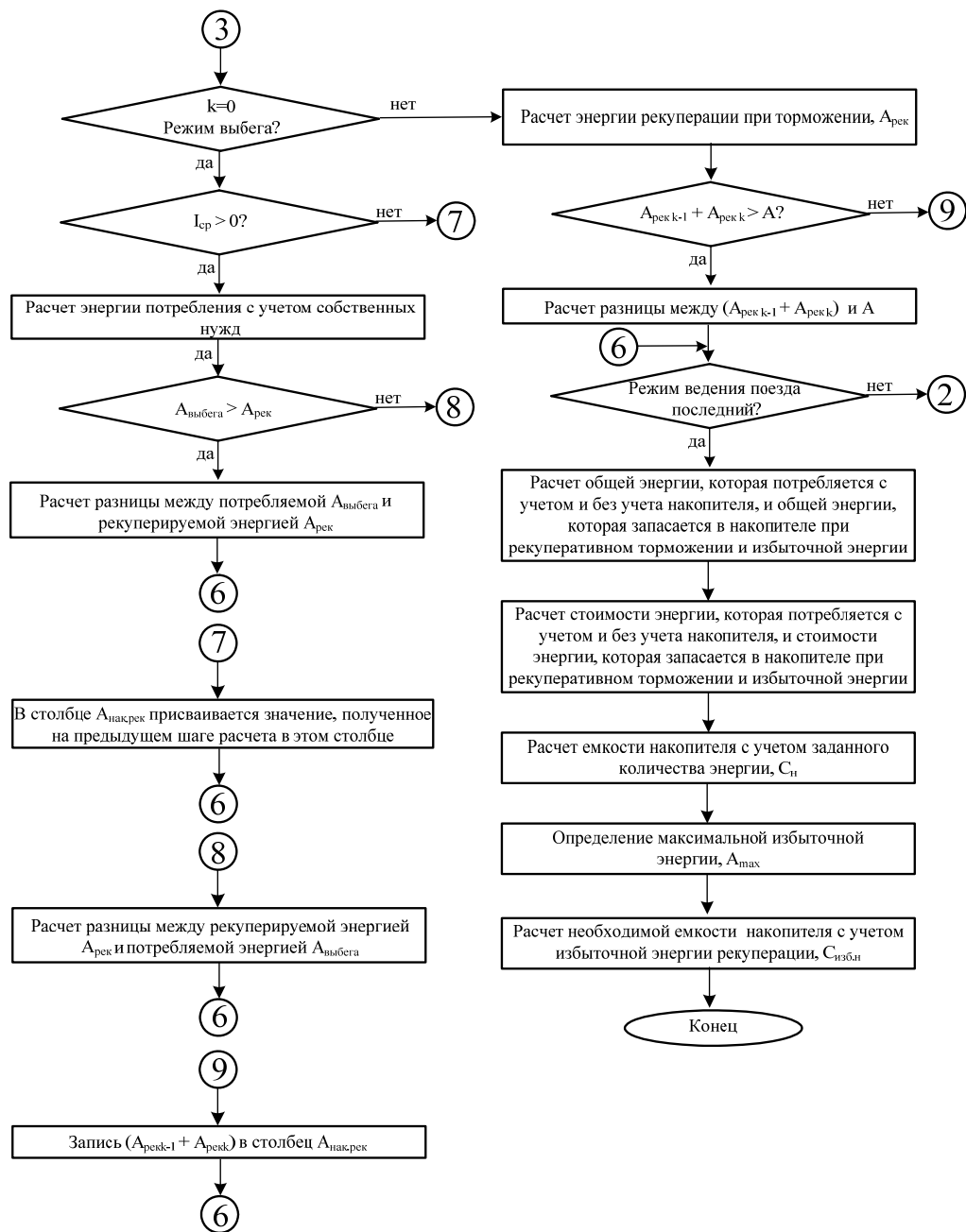


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения количества и стоимости потребляемой, рекуперированной в накопитель и избыточной энергии рекуперации электропоезда метрополитена (окончание)

Проверяется условие: «Режим выбега?». Если условие выполняется, тогда осуществляется проверка условия $I_{ср} > 0$. В противном случае осуществляется расчет режима рекуперативного торможения. Расчет энергии потребления выполняется по выражению (1).

Проверяется условие « $I_{cp} > 0$?». Если условие выполняется, тогда осуществляется расчет потребляемой энергии с учетом потребления на собственные нужды электропоезда и результат вносится в колонки $A_{потр}$ и $A_{потр.нак}$, в колонках $A_{нак.рек}$ и $A_{изб.рек}$ записываются нули. Расчет энергии потребления выполняется по выражению (2). В противном случае присваиваются нули во всех четырех колонках.

Осуществляется расчет энергии рекуперации в случае режима рекуперативного торможения по выражению (3).

Проверяется условие « $A_{рек} > A$?». Если условие выполняется, тогда вычисляется разница между $A_{рек}$ и A , результат расчета вносится в колонку $A_{изб.рек}$, в колонку $A_{нак.рек}$ присваивается значение, равное A , в колонки $A_{потр}$ и $A_{потр.нак}$ записываются нули. В противном случае $A_{рек}$ вносится в колонку $A_{нак.рек}$, в колонки $A_{потр}$, $A_{потр.нак}$ и $A_{изб.рек}$ записываются нули.

Вычисляется энергия потребления или рекуперации в зависимости от режима движения с учетом накопленной энергии при торможении либо без нее.

Проверяется условие «Режим тяги?». Если условие выполняется, тогда вычисляется энергия, потребляемая на тягу по выражению (1) и записывается результат в столбец $A_{потр}$. В противном случае рассчитывается режим выбега или торможения.

Проверяется условие « $A_{тяги} > A_{рек}$?». Если условие выполняется, тогда выполняется расчет разницы между $A_{тяги}$ и $A_{рек}$, результат записывается в столбец $A_{потр.нак}$, в колонки $A_{нак.рек}$ и $A_{изб.рек}$ записываются нули. В противном случае рассчитывается разница между $A_{рек}$ и $A_{тяги}$, результат записывается в колонку $A_{нак.рек}$, в колонки $A_{потр.нак}$ и $A_{изб.рек}$ записываются нули.

Проверяется условие «Режим выбега?». Если условие выполняется, тогда проверка следующего условия $I_{cp} > 0$. В противном случае рассчитывается режим рекуперативного торможения.

Проверяется условие « $I_{cp} > 0$?». Если условие выполняется, тогда рассчитывается энергия с учетом потребления на собственные нужды по выражению (2) и результат записывается в столбец $A_{потр}$, проверяется следующее условие: « $A_{выбега} > A_{рек}$?». В противном случае присваиваются нули в колонках $A_{потр.нак}$, $A_{потр}$ и $A_{изб.рек}$, в колонке $A_{нак.рек}$ присваивается значение предыдущего режима движения электропоезда.

Проверяется условие « $A_{выбега} > A_{рек}$?». Если условие выполняется, тогда рассчитывается разница между $A_{выбега}$ и $A_{рек}$, результат потребления на собственные нужды записывается в колонку $A_{потр.нак}$, в колонки $A_{нак.рек}$ и $A_{изб.рек}$ записываются нули. В противном случае рассчитывается разница между $A_{рек}$ и $A_{выбега}$, результат записывается в колонку $A_{нак.рек}$, в колонки $A_{потр.нак}$ и $A_{изб.рек}$ записываются нули.

Рассчитывается энергия рекуперации для режима рекуперативного торможения по выражению (3).

Проверяется условие « $(A_{рек\ k-1} + A_{рек\ k}) > A$?». Если условие выполняется, тогда рассчитывается разница между $A_{рек\ k-1} + A_{рек\ k}$ и A , результат расчета вносится в колонку $A_{изб.рек}$, в колонку $A_{нак.рек}$ вносится количество энергии равное A , в колонки $A_{потр}$ и $A_{потр.нак}$ записываются нули. В противном случае $(A_{рек\ k-1} + A_{рек\ k})$ записывается в колонку $A_{нак.рек}$, в колонки $A_{потр}$, $A_{потр.нак}$ и $A_{изб.рек}$ записываются нули.

Выполняется проверка условия «Режим ведения электропоезда последний?» после каждого расчета электроэнергии, которая потребляется, накапливается либо отдается в контактную сеть в зависимости от режима движения электропоезда. Если условие выполняется, тогда рассчитывается общая энергия, которая потребляется без учета и с учетом накопителя; общая энергия, которая запасается в накопителе за время рекуперативного торможения и общая избыточная энергия. Общая

енергия, которая запасается в накопителе, определяется как сумма значений, которые содержатся в колонке $A_{\text{нак.рек}}$ для режимов рекуперативного торможения. В противном случае происходит расчет следующего режима движения электропоезда.

Вычисляется стоимость электроэнергии, которая потребляется без учета и с учетом накопителя; стоимость электроэнергии, которая запасается в накопителе и стоимость избыточной электроэнергии по выражениям:

$$Q_{\text{потр}} = A_{\text{потр}} \cdot q; \quad (4)$$

$$Q_{\text{потр.нак}} = A_{\text{потр.нак}} \cdot q; \quad (5)$$

$$Q_{\text{нак.рек}} = A_{\text{нак.рек}} \cdot q; \quad (6)$$

$$Q_{\text{изб.рек}} = A_{\text{изб.рек}} \cdot q. \quad (7)$$

Выполняется расчет энергоемкости накопителя с учетом заданного количества электроэнергии, которую может сохранить накопитель, по выражению:

$$C_{\text{ен}} = \frac{2 \cdot A}{U_{\text{енmax}}^2 - U_{\text{енmin}}^2}. \quad (8)$$

Определяется максимальное значение избыточной электроэнергии за время заданного режима движения электропоезда метрополитена, A_{max} .

Рассчитывается необходимая энергоемкость накопителя с учетом накопления избыточного количества электроэнергии:

$$C_{\text{енmax}} = \frac{2 \cdot (A + A_{\text{max}})}{U_{\text{енmax}}^2 - U_{\text{енmin}}^2}. \quad (9)$$

В качестве примера выполнен расчет количества и стоимости потребляемой, накапливаемой и избыточной электроэнергии, а также необходимой емкости накопителя при следующих входных данных: $K=16$; $q=0,3648$ грн.; $U_{\text{енmin}}=550$ В; $U_{\text{енmax}}=975$ В; $A=10$ кВт·час. Количество режимов движения получено путем моделирования движения поезда метрополитена по графику между тремя станциями. Расчет выходных данных осуществляется по выражениям (1)–(9) в соответствии с алгоритмом (рис. 1). Входные данные для каждого режима движения электропоезда и рассчитанные выходные данные приведены в табл. 1.

Таблиця 1. Результати расчета потребляемой, накапливаемой и избыточной электроэнергии

Входные данные				Выходные данные			
Режим движения	t, с	I _{ср} , А	U _{ср} , В	A _{потр.} , кВт·час	A _{потр.нак.} , кВт·час	A _{нак.рек.} , кВт·час	A _{изб.рек.} , кВт·час
1	22,7	3500	750	16,55	16,55	0	0
0	40,7	0	825	0	0	0	0
1	8,3	1700	790	3,1	3,1	0	0
0	10,2	0	825	0	0	0	0
-1	22,1	2250	900	0	0	10	2,43
0	30	0	825	0	0	10	0
1	25	3500	750	18,23	8,23	0	0
0	50,4	0	825	0	0	0	0
1	15,1	2000	775	6,5	6,5	0	0
0	25,1	0	825	0	0	0	0
-1	19,1	2000	870	0	0	9,23	0
0	30	0	825	0	0	9,23	0
1	20	2700	800	12	2,77	0	0
0	39,3	0	825	0	0	0	0
-1	17,7	2250	900	0	0	9,96	0
0	30	0	825	0	0	9,96	0
Всего:				56,38	37,15	29,19	2,43
Стоимость электроэнергии, грн.				20,57	13,55	10,65	0,89

По выражениям (8)–(9) рассчитана соответственно энергоемкость с учетом заданного количества электроэнергии и необходимая энергоемкость накопителя с учетом накопления избыточного количества электроэнергии $C_{ен}=111,1 \text{ Ф}$ и $C_{ен\max}=138,1 \text{ Ф}$.

По результатам рассчитанных данных (табл. 1) построена диаграмма (рис. 2), на которой приведено количество потребляемой и избыточной электроэнергии без накопителя и с применением накопителя заданной энергоемкости.

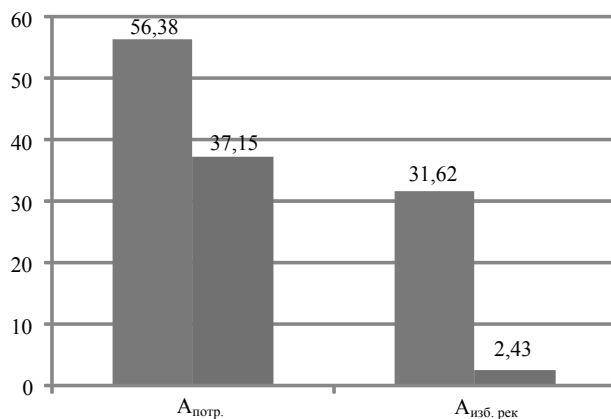


Рис. 2. Диаграмма потребляемой и избыточной электроэнергии без накопителя и с применением накопителя заданной энергоемкости (A=10 кВт·час)

Выводы. Предложенная в работе методика позволяет рассчитать количество электроэнергии рекуперации при установке емкостного накопителя энергии на электропоезде метрополитена.

На основании разработанного алгоритма выполнен пример расчета, который позволил установить, что для заданного режима движения энергоемкость установленного емкостного накопителя составляет 111,1 Ф, необходимая энергоемкость должна составлять 138,1 Ф.

Анализ полученных результатов показывает, что при заданном количестве накапливаемой энергии ($A = 10$ кВт·час) количество потребляемой электроэнергии уменьшается на 34,1 %, количество избыточной электроэнергии составляет 4,3 % от общего количества потребляемой энергии из сети (рис. 2), которое возвращается в контактную сеть или рассеивается на резисторах в виде тепла.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на определение оптимальной энергоемкости ЕНЭ при заданном режиме движения электропоезда метрополитена.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хворост Н. В.* Концепция новой структуры системы электрической тяги метрополитена / *Н. В. Хворост* // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – Харьков, ХГАГХ, 2003. – Вып. № 53. – С. 172 – 179.
2. *Шевлюгин М. В.* Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии / *М. В. Шевлюгин, К. С. Желтов* // Журнал «Наука и техника транспорта». – М., 2008. – Вып. № 1. – С. 15 – 20.
3. *Родькин Д. И.* Особенности осуществления электропривода с накопителями энергии / *Д. И. Родькин, Т. В. Величко* // Научные труды КГПИ «Проблемы создания машин и технологий». – Кременчук: КГПИ, 2000. – Вып. 2/2000 (9). – С. 124–132.
4. *Щуров Н. И.* Применение накопителей энергии в системах электрической тяги / *Н. И. Щуров, К. В. Щеглов, А. А. Штанг* // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 1 (51). – С. 99 – 104.
5. *Сулим А. А.* Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена / *А. А. Сулим, С. Д. Сычев, В. Р. Распопин, П. А. Хозя, А. А. Мельник, В. В. Федоров* // X Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів. Збірник матеріалів конференції. – Кременчук, КрНУ, 2012. – С. 344.
6. *Улитин В. Г.* Проблема использования избыточной энергии рекуперации на городском электрическом транспорте / *В. Г. Улитин* // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – Харьков, ХГАГХ, 2009. – Вып. № 88. – С. 266 – 271.
7. *Писарев Л. Т.* Рекуперативное торможение поездов с использованием энергоемких конденсаторов / *Л. Т. Писарев, Ю. В. Черняк, М. Р. Терованесов* // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2009. – № 17. – С. 97 – 105.
8. *Штанг А. А.* Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / *Штанг А. А.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 19 с.: ил.
9. *Сулим А. А.* Обоснование места установки емкостных накопителей энергии в системах тягового электроснабжения метрополитена / *А. А. Сулим* // Научно-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вып. 2/2013 (22). – Часть 2. – С. 282–285.