

4. Markov, V. V., & Slyadevskaya, K. P. (2000) Index table PWM Self-Regulation Interval of Voltage. *Elektrotehnika* [Electrical], 1, 23–28 (in Russian).
5. Gostev, V. I., & Steklov, V. K. (1998) *Automatic Control Systems with Digital Regulators*. Kiev, Radiomato. 704 p. (in Russian).
6. Moyn, V. S. (1986) *Stabilizing Transistor Inverters*. Moscow, Energoautomizdat. 376 p. (in Russian).
7. Baskakov, S. I. (1988) *Radiotechnical Circuits and Signals*. 2 the Edition. Moscow, Vysshaya Shkola. 448 p. (in Russian).
8. Bronshtein, I. N., & Semendyaev, K. A. (1964) *Reference Book on Mathematics*. Moscow, Science. 608 p. (in Russian).
9. Stryzhniou, A. G., Shihov, A. A., & Simankov, V. I. (2013) Peculiarities of Temporary Control Method of Two-Phase Asynchronous Motor During Windings Feed by Single and Multiple PWM Pulses. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy Odnadsatoi Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii* [Science for Education, Industry, Economics. Proceedings of the XIth International Scientific and Technical Conference], Minsk: BNTU, Vol. 1, 211 p. (in Russian).
10. Romash, E. M., Drabovich, Iu. I., Iurchenko, N. N., & Shevchenko, P. N. (1988) *High-Frequency Inverters*. Moscow, Radio and Communication. 288 p. (in Russian).

Поступила 22.01.2014

УДК [621.333.41+519.254]:001.891.5

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА ПРИ УСТАНОВКЕ НАКОПИТЕЛЯ НА ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

СУЛИМ А. А.

ГП «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»

E-mail: ank-17@ya.ru

В настоящее время большое внимание уделяется повышению энергоэффективности на эксплуатируемом электрифицированном городском транспорте. Перспективным направлением по повышению энергоэффективности на данном виде транспорта является применение рекуперативного торможения. Для дополнительного повышения энергоэффективности предложено использовать емкостной накопитель электроэнергии на шинах тяговой подстанции. Одна из важных задач – оценка применения энергии рекуперации с накопителем и без него.

Проведенный анализ работ показал, что существующие алгоритмы расчета не позволяют в полном объеме выполнять расчеты количества и стоимости энергии рекуперации без накопителя и при его использовании. Исходя из этого вытекает актуальность данной темы. Цель работы – составление методики расчета и алгоритма для определения количества и стоимости потребляемой, рекуперированной и избыточной энергии электрифицированного городского транспорта исходя из заданного режима движения на перегоне. Разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать количество и стоимость потребляемой, рекуперированной и избыточной электроэнергии с учетом режима движения электрифицированного городского транспорта на перегоне

при установке емкостного накопителя на тяговой подстанции. На основании разработанного алгоритма для заданного режима движения поезда метрополитена выполнен пример расчета количества энергии рекуперации и ее стоимости, в том числе при ограниченной энергоемкости накопителя, для одновременно находящихся четырех поездах на перегоне.

Ключевые слова: энергия рекуперации, электрифицированный городской транспорт, накопитель, тяговая подстанция.

Ил. 3. Табл. 3. Библиогр.: 11 назв.

THE CALCULATION OF THE ENERGY RECOVERY ELECTRIFIED URBAN TRANSPORT DURING THE INSTALLATION DRIVE FOR TRACTION SUBSTATION

SULIM A. A.

SP "Ukrainian Scientific-Research Institute of Car-Building"

At present a great attention is paid to increasing of energy efficiency at operated electrified urban transport. Perspective direction for increasing energy efficiency at that type of transport is the application of regenerative braking. For additional increasing of energy efficiency there were suggested the use of capacitive drive on tires of traction substation. One of the main task is the analysis of energy recovery application with drive and without it.

These analysis demonstrated that the calculation algorithms don't allow in the full volume to carry out calculations of amount and cost of energy recovery without drive and with it. That is why we see the current interest to this topic. The purpose of work is to create methods of algorithms calculation for definite amount and cost of consumed, redundant and recovery energy of electrified urban transport due to definite regime of motion on wayside. There is algorithm developed, which allow to calculate amount and cost of consumed, redundant and recovery energy of electrified urban transport on wayside during the installation capacitive drive at traction substation. On the basis of developed algorithm for the definite regime of wagon motion of subway there were fulfilled the example of energy recovery amount and its cost calculation, among them with limited energy intensity drive, when there are 4 trains on wayside simultaneously.

Keywords: energy recovery, electrified urban transport, drive, traction substation.

Fig. 3. Tab. 3. Ref.: 11 titles.

Проблема энергосбережения на электрифицированном городском транспорте (ЭГТ) является очень актуальной [1, 2]. Известно, что ЭГТ (поезда, трамваи, троллейбусы и т. д.) характеризуется неравномерным графиком потребления электроэнергии, которое особенно значительно в периоды разгона, менее значительно в периоды равномерного движения и отсутствует при торможении. Вследствие этого тяговые подстанции (ТП) непрерывно испытывают значительные колебания нагрузки. При пиковых нагрузках, возникающих в процессе наложения пусковых токов нескольких тяговых средств, работающих на перегоне, снижается напряжение на шинах ТП. Это замедляет процессы пуска электрического транспорта и приводит к дополнительным потерям электроэнергии, в результате чего требуется увеличение установленной мощности силового оборудования ТП для компенсации пиковых нагрузок [3].

Одним из перспективных направлений по уменьшению установленной мощности силового оборудования ТП, а также повышению экономичности ЭГТ является применение рекуперативного торможения [3–8]. В настоящее время создаются, испытываются и внедряются опытные образцы ЭГТ с микропроцессорной системой управления (МПСУ) и возможностью рекуперации электроэнергии торможения в сеть [4]. По некоторым данным, применение рекуперативного торможения позволит экономить около 5–30 % электроэнергии, расходуемой на тягу [5–7]. Еще одним вопросом, связанным с эффективностью применения рекуперации, является проблема использования избыточной электроэнергии рекуперации в те интервалы времени, когда не подключены потребители. Проблему использования избыточной электроэнергии рекуперации можно решить установкой накопителя электроэнергии (в частности, емкостного накопителя) в системе электроснабжения ЭГТ [6, 7]. С его помощью можно еще дополнительно экономить около 10–20 % электроэнергии, расходуемой на тягу [6, 7].

Выбор емкостного накопителя электроэнергии (ЕНЭ) обусловлен рядом преимуществ его характеристик по сравнению с другими видами накопителей энергии [3, 6, 7, 9, 10]. Этот вид накопителя также удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к устройствам накопления электроэнергии для систем электрической тяги [11].

Следует отметить, что в [5–8] приводятся ориентировочные данные по возможной экономии электроэнергии от применения рекуперативного торможения и накопителя. На практике, применительно к конкретному перегону, эффективность рекуперированной электроэнергии ЭГТ в значительной мере будет зависеть от следующих факторов: интенсивности движения, расстояния между остановками, профиля пути и загрузки городского транспорта [8]. Таким образом, технико-экономический эффект от применения рекуперативного торможения без и с использованием накопителя электроэнергии будет отличаться на различных перегонах. Как результат, на некоторых перегонах экономически целесообразно применять только рекуперативное торможение без установки накопителя.

Анализ [4–9] показал, что существующие методы не позволяют в полной мере выполнять расчеты количества и стоимости электроэнергии рекуперации без и с накопителем с учетом вышеприведенных факторов. Метод расчета избыточной электроэнергии рекуперации [9] учитывает профиль пути, интенсивность и режим движения на перегоне, однако не позволяет выполнять следующие расчеты: потребляемой и рекуперированной электроэнергии без применения накопителя; стоимости потребляемой, рекуперированной и избыточной электроэнергии; количества и стоимости избыточной электроэнергии, которую не может принять накопитель исходя из своей энергоемкости; необходимой емкости накопителя и т. д.

Цель работы состоит в выведении методики расчета и алгоритма для определения количества и стоимости потребляемой, рекуперированной и избыточной электроэнергии ЭГТ исходя из заданного режима движения на перегоне. Известно, что при существующей инфраструктуре энергоснабжения на ЭГТ использование электроэнергии рекуперации имеет вероятностный характер [7]. Суть вероятностного метода в данном случае заклю-

чается в построении матрицы, которая учитывает все возможные комбинации режимов движения ЭГТ на перегоне. Размер матрицы (количество строк) зависит от интенсивности движения на перегоне. Количество строк матрицы равно числу возможных комбинаций режимов движения [9]. Первый столбец матрицы соответствует количеству ЭГТ, работающего в режиме тяги, второй – в режиме рекуперативного торможения, третий – в режиме выбега. Таким образом, определять вероятность появления токов рекуперации можно с помощью методов теории вероятности. С учетом этого разработан алгоритм определения количества и стоимости потребляемой, рекуперированной и избыточной электроэнергии ЭГТ (рис. 1), реализация которого включает этапы вычисления. Суть их рассмотрена ниже.

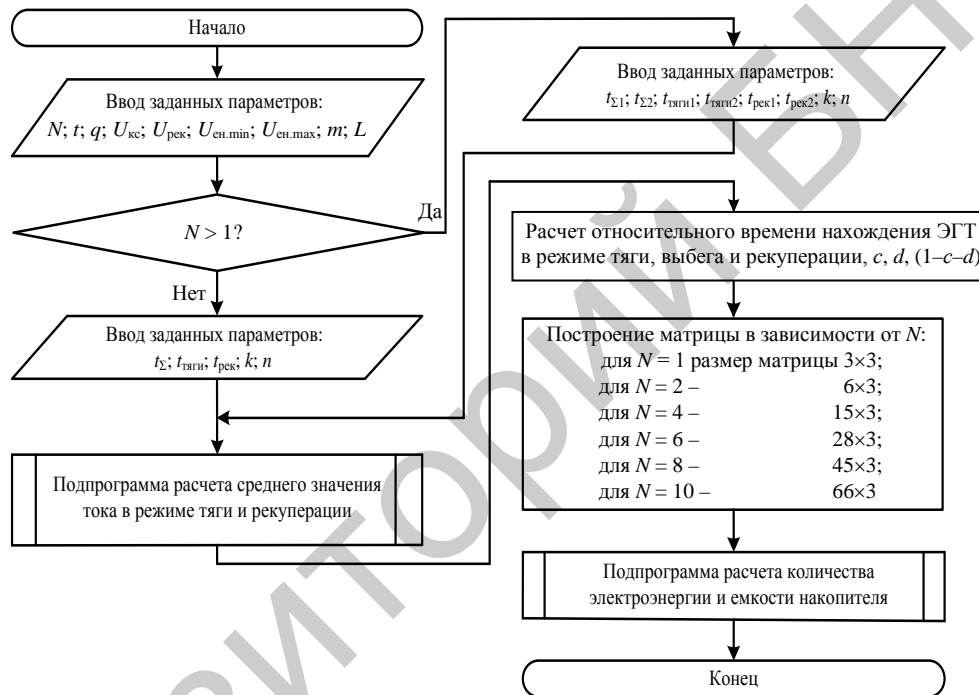


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения количества и стоимости потребляемой, рекуперированной и избыточной электроэнергии ЭГТ

Оператором задаются параметры, необходимые для расчета количества и стоимости потребляемой, рекуперированной и избыточной электроэнергии ЭГТ: количество транспортных средств, работающих на перегоне (N); время работы на перегоне в сутки при заданной интенсивности движения (t); стоимость 1 кВт·ч электроэнергии (q); напряжение контактной сети в режиме тяги ($U_{кc}$); минимальное напряжение на емкостном накопителе ($U_{ен.min}$); максимальное напряжение на емкостном накопителе ($U_{ен.max}$); масса транспортного средства с пассажирами (m); длина перегона (L).

Задаются данные для двух вариантов:

1) на перегоне работает одно транспортное средство: общее время движения на перегоне t_{Σ} ; продолжительность режима тяги $t_{тяги}$ и рекуперации

$t_{рек}$; количество включений контроллера машиниста КМ в режим тяги k и рекуперации n ;

2) на перегоне работают два или более транспортных средств: общее время движения на перегоне в попутном и обратном направлениях $t_{\Sigma 1}, t_{\Sigma 2}$; продолжительность режима тяги $t_{тяги1}, t_{тяги2}$ и рекуперации при движении в попутном и обратном направлениях $t_{рек1}, t_{рек2}$; напряжение на токоприемнике в режиме рекуперации $U_{рек}$; количество включений КМ в режим тяги и рекуперации k, n .

Выполняется подпрограмма расчета среднего значения тока в режимах тяги и рекуперации на перегоне (рис. 2). Определяются средние значения токов в режиме тяги и рекуперации при условиях $k > 1$ и $n > 1$ по выражениям:

$$I_{ср.тяги} = \frac{1}{t_{тяги}} \sum_{i=1}^k I_k t_k; \quad (1)$$

$$I_{ср.рек} = \frac{1}{t_{рек}} \sum_{i=1}^n I_n t_n. \quad (2)$$

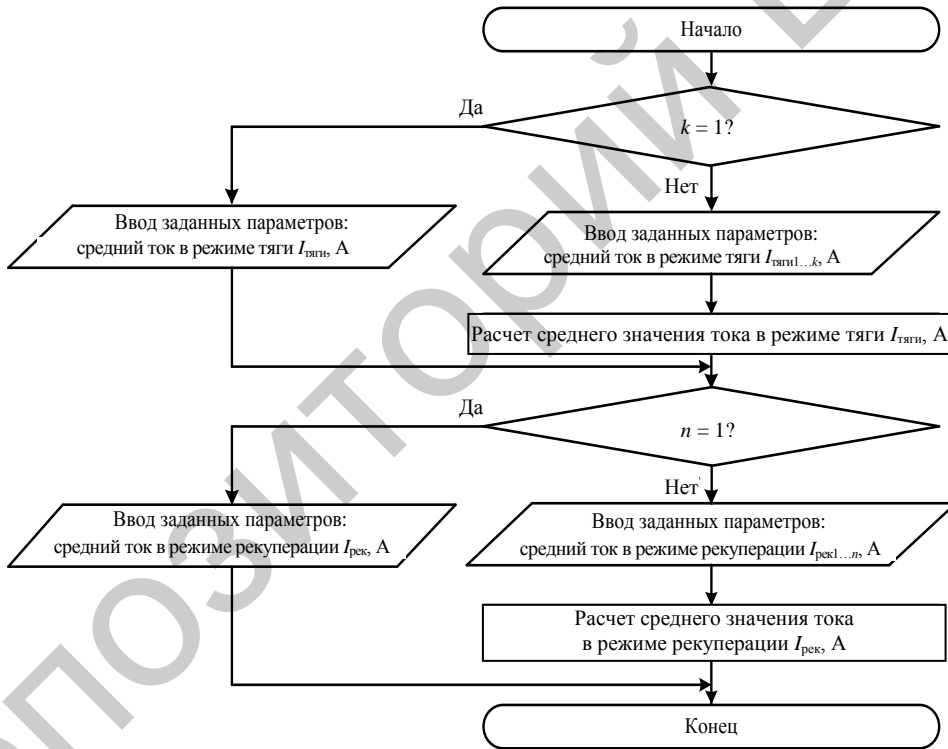


Рис. 2. Блок-схема алгоритма подпрограммы расчета среднего значения тока в режимах тяги и рекуперации

Выполняется расчет относительного времени нахождения ЭГТ в режимах тяги (c), рекуперации (d) и выбега ($1-c-d$) по выражениям:

для случая $N = 1$:

$$c = \frac{t_{тяги}}{t_{\Sigma}}; \quad d = \frac{t_{рек}}{t_{\Sigma}}; \quad 1-c-d = \frac{t_{\Sigma} - (t_{тяги} + t_{рек})}{t_{\Sigma}}; \quad (3)$$

для случая $N \geq 2$:

$$c = \frac{t_{\text{тяги1}} + t_{\text{тяги2}}}{t_{\Sigma 1} + t_{\Sigma 2}}; \quad d = \frac{t_{\text{рек1}} + t_{\text{рек2}}}{t_{\Sigma 1} + t_{\Sigma 2}}; \quad (4)$$

$$1-c-d = \frac{t_{\Sigma 1} + t_{\Sigma 2} - t_{\text{тяги1}} - t_{\text{тяги2}} - t_{\text{рек1}} - t_{\text{рек2}}}{t_{\Sigma 1} + t_{\Sigma 2}}. \quad (5)$$

Строится матрица в зависимости от заданной интенсивности движения на перегоне.

Выполняется подпрограмма расчета емкости накопителя электроэнергии (рис. 3), которая включает приведенные ниже вычисления.

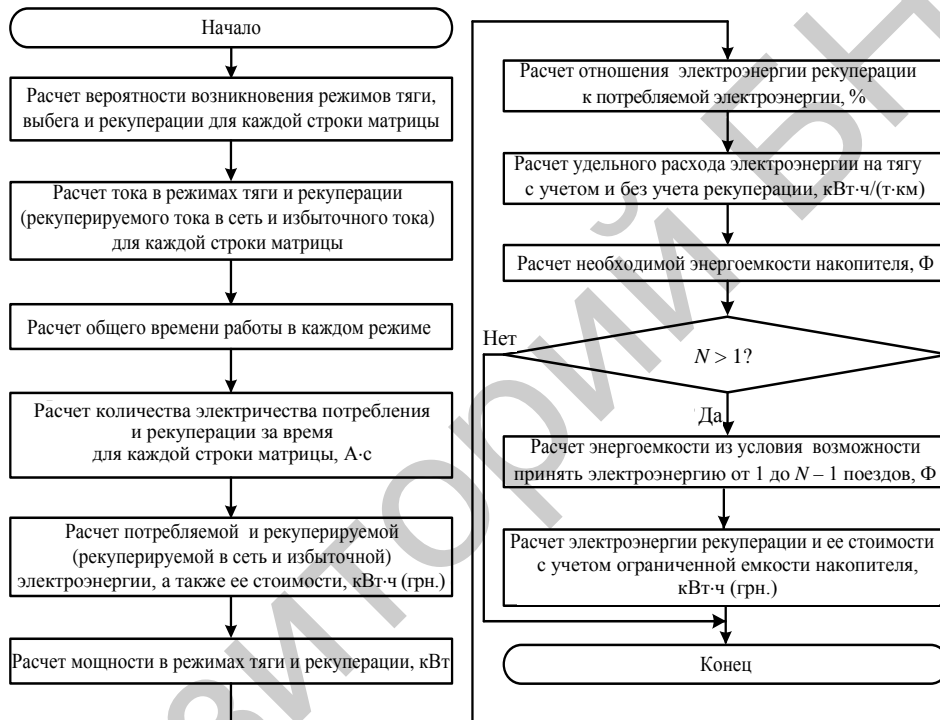


Рис. 3. Блок-схема алгоритма подпрограммы расчета количества электроэнергии (стоимости) и емкости накопителя

Вычисляются вероятности возникновения режимов для каждой строки матрицы по выражению [9]

$$p = \left(\frac{N!}{a!b!(N-a-b)!} \right) c^a d^b (1-c-d)^{N-a-b}, \quad (6)$$

где a – количество электропоездов, движущихся в режиме тяги; b – количество электропоездов, движущихся в режиме рекуперации; $(N-a-b)$ – количество электропоездов, движущихся в режиме выбега.

Выполняется расчет тока в режимах тяги и рекуперации для каждой строки матрицы:

$$I_{\text{тяги}} = I_{\text{ср.тяги}} a; \quad (7)$$

$$I_{\text{рек}} = I_{\text{ср.рек}} b. \quad (8)$$

Проверяется условие для каждой строки матрицы «Ток тяги не менее тока рекуперации?»: если условие выполняется, тогда в столбце «Избыточный ток рекуперации» записывается нуль. В противном случае в столбце «Избыточный ток рекуперации» записывается разность между токами рекуперации и тяги: $I_{\text{изб.рек}} = I_{\text{рек}} - I_{\text{тяги}}$.

Осуществляется расчет для каждой строки матрицы общего времени работы по выражению

$$t = t_{\Sigma} p. \quad (9)$$

Выполняется расчет для каждой строки матрицы количества электричества потребления и рекуперации (рекуперированного в сеть и избыточного) за общее время работы t в данном режиме по выражениям:

$$B = I_{\text{тяги}} t; \quad (10)$$

$$C = I_{\text{рек}} t; \quad (11)$$

$$D = I_{\text{изб.рек}} t. \quad (12)$$

Выполняется расчет электроэнергии потребления и рекуперации (рекуперированной в сеть и избыточной), а также ее стоимости за общее время работы по выражениям [9]:

$$W_{\text{тяги}} = \frac{\Sigma BU_{\text{кв}}}{3600 \cdot 10^3}; \quad (13)$$

$$W_{\text{рек}} = \frac{\Sigma CU_{\text{рек}}}{3600 \cdot 10^3}; \quad (14)$$

$$W_{\text{изб.рек}} = \frac{\Sigma DU_{\text{рек}}}{3600 \cdot 10^3}; \quad (15)$$

$$Q_{\text{тяги}} = W_{\text{тяги}} q; \quad (16)$$

$$Q_{\text{рек}} = W_{\text{рек}} q; \quad (17)$$

$$Q_{\text{изб.рек}} = W_{\text{изб.рек}} q. \quad (18)$$

Осуществляется расчет среднего значения мощности потребления и рекуперации:

$$P_{\text{тяги}} = \frac{W_{\text{тяги}}}{t}; P_{\text{рек}} = \frac{W_{\text{рек}}}{t}; P_{\text{изб.рек}} = \frac{W_{\text{изб.рек}}}{t}. \quad (19)$$

Вычисляются отношения электроэнергии рекуперации к электроэнергии потребления:

$$\gamma = \frac{W_{\text{рек}}}{W_{\text{тяги}}} \cdot 100 = \frac{P_{\text{рек}}}{P_{\text{тяги}}} \cdot 100; \quad (20)$$

$$\psi = \frac{W_{\text{изб.рек}}}{W_{\text{тяги}}} \cdot 100 = \frac{P_{\text{изб.рек}}}{P_{\text{тяги}}} \cdot 100. \quad (21)$$

Выполняется расчет удельной электроэнергии потребления и рекуперации (рекуперированной в сеть и избыточной) по выражениям:

$$a_{\text{тяги}} = \frac{I_{\text{ср.тяги}} U_{\text{кв}} t_{\text{тяги}}}{3600mL}; \quad (22)$$

$$a_{\text{рек}} = \frac{I_{\text{ср.рек}} U_{\text{рек}} t_{\text{рек}}}{3600mL}; \quad (23)$$

$$a_{\text{изб.рек}} = \frac{a_{\text{тяги}}}{100} \psi. \quad (24)$$

Определяется необходимая энергоемкость накопителя электроэнергии при заданной интенсивности движения

$$C_{\text{енз}} = \frac{2I_{\text{ср.рек}} NU_{\text{рек}} t_{\text{рек}}}{U_{\text{ен.мах}}^2 - U_{\text{ен.мин}}^2}. \quad (25)$$

Проверка условия « $N > 1$?»: если условие выполняется, то осуществляется расчет необходимой емкости, чтобы принять электроэнергию рекуперации отдельно для каждого из случаев от 1 до $(N - 1)$ поездов. В противном случае подпрограмма расчета количества электроэнергии (стоимости) и емкости накопителя завершается.

Расчет необходимой энергоемкости накопителя электроэнергии, чтобы принять электроэнергию рекуперации для каждого из случаев от 1 до $(N - 1)$ поездов, определяется по выражению (25). Отличительной особенностью данного расчета от предыдущего является то, что вместо заданного N подставляются значения от 1 до $(N - 1)$.

Определяются избыточная электроэнергия, которую может принять накопитель при ограниченном объеме, и ее стоимость:

$$W_{\text{изб.рек1...N-1}} = \frac{\sum_{i=1}^{K-1} D_i U_{\text{рек}}}{3600 \cdot 10^3}; \quad (26)$$

$$Q_{\text{изб.рек1...N-1}} = W_{\text{изб.рек1...N-1}} q, \quad (27)$$

где $\sum_{i=1}^{K-1} D_i$ – сумма избыточных токов за общее время работы ЭГТ на перегоне с учетом ограничения тока рекуперации; K – количество возможных комбинаций режимов движения ЭГТ на перегоне.

Суть расчетов избыточной электроэнергии и ее стоимости заключается в пересчете колонок «Избыточный ток рекуперации» и «Избыточный ток рекуперации за время» построенной матрицы (табл. 1) при неизменном времени рекуперации.

Вычисляется рекуперлируемая электроэнергия, которую не может принять накопитель исходя из установленной энергоемкости накопителя, и ее стоимость по выражениям:

$$W_{не1...N-1} = W_{изб.рек} - W_{изб.рек1...N-1}; \quad (28)$$

$$Q_{не1...N-1} = Q_{изб.рек} - Q_{изб.рек1...N-1}. \quad (29)$$

По разработанному алгоритму выполнен пример расчета количества и стоимости потребляемой, рекуперлируемой и избыточной электроэнергии, а также необходимой емкости накопителя при следующих входных данных: $N = 4$; $t = 7200$ с; $q = 0,3648$ грн.; $U_{кв} = 825$ В; $U_{ен.мин} = 550$ В; $U_{ен.макс} = 975$ В; $m = 246,88$ т; $L = 0,727$ км; $t_{\Sigma 1} = 101,4$ с; $t_{\Sigma 2} = 101,4$ с; $t_{тяги1} = 29,2$ с; $t_{тяги2} = 29,2$ с; $t_{рек1} = 15,4$ с; $t_{рек2} = 15,4$ с; $U_{рек} = 900$ В; $k = 1$; $n = 1$; $I_{ср.тяги} = 3500$ А; $I_{ср.рек} = 2250$ А.

В соответствии с расчетом (рис. 2) средние значения токов в режимах тяги и рекуперации равны: $I_{ср.тяги} = 3500$ А и $I_{ср.рек} = 2250$ А. По выражениям (4), (5) рассчитаны относительные длительности циклов режимов тяги, рекуперации и выбега: $c = 0,29$; $d = 0,15$; $1-c-d = 0,56$.

Построена матрица (табл. 1) при одновременно находящихся четырех электропоездах на перегоне, а также рассчитаны величины для каждой строки матрицы по формулам (6)–(12). Как видно из табл. 1, режимы с потребляемым током характерны для случаев 1–10, режимы с током рекуперации – для случаев 2, 4–5, 7–9, 11–14, режимы с избыточным током имеют место для случаев 7–8, 11–14.

Таблица 1

Результаты расчета потребляемого, рекуперлируемого и избыточного токов для одновременно находящихся четырех электропоездов на перегоне

№ п/п	Тяга a	Рекуперация b	Выбег $N-a-b$	Вероятность режима $p \cdot 10^{-2}$	$I_{тяги}$, А	$I_{рек}$, А	$I_{изб.рек}$, А	t , с	B , А·с	C , А·с	D , А·с
1	4	0	0	0,6876692	14000	0	0	49,51	693170,6	0	0
2	3	1	0	1,4506995	10500	2250	0	104,5	1096729,0	235013	0
3	3	0	1	5,3506317	10500	0	0	385,2	4045078,0	0	0
4	2	2	0	1,1476424	7000	4500	0	82,63	578411,8	371836	0
5	2	1	1	8,4657256	7000	2250	0	609,5	4266726,0	1371448	0
6	2	0	2	15,6121170	7000	0	0	1124	7868507,0	0	0
7	1	3	0	0,4035090	3500	6750	3250	29,05	101684,3	196105	94421
8	1	2	1	4,4648005	3500	4500	1000	321,5	1125130,0	1446595	321466
9	1	1	2	16,4675750	3500	2250	0	1186	4149829,0	2667747	0
10	1	0	3	20,2458510	3500	0	0	1458	5101954,0	0	0
11	0	4	0	0,0532024	0	9000	9000	3,831	0	34475	34475
12	0	3	1	0,7849078	0	6750	6750	56,51	0	381465	381465
13	0	2	2	4,3424772	0	4500	4500	312,7	0	1406963	1406962
14	0	1	3	10,6776060	0	2250	2250	768,8	0	1729772	1729772
15	0	0	4	9,8455849	0	0	0	708,9	0	0	0
Всего:									29027219,0	9841420	3968561

Результаты энергетического расчета в режимах потребления и рекуперации, выполненные по выражениям (13)–(24), представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты энергетического расчета в режимах потребления и рекуперации

Показатель	Значение показателя при		
	потреблении при тяге	рекуперации	избыточности
Электроэнергия, кВт·ч	6652,07	2460,36	992,14
Среднее значение мощности, кВт	3326,04	1230,18	496,07
Удельная электроэнергия, Вт·ч/(т·км)	130,50	48,26	19,46
Стоимость электроэнергии, грн.	2426,68	897,54	361,93
Отношение электроэнергии к электроэнергии потребления, %	–	36,99	14,91

По выражению (25) рассчитана необходимая энергоемкость накопителя электроэнергии при заданной интенсивности движения, которая равна $C_{\text{енз}} = 384,93 \text{ Ф}$.

Результаты расчета энергоемкости, избыточной электроэнергии и ее стоимости, которые определены по формулам (26)–(29), представлены в табл. 3 для следующих случаев при ограниченной возможности принять электроэнергию от:

- трех электропоездов ($I_{\text{ср.рек}} = 6750 \text{ А}$);
- двух электропоездов ($I_{\text{ср.рек}} = 4500 \text{ А}$);
- одного электропоезда ($I_{\text{ср.рек}} = 2250 \text{ А}$).

Таблица 3

Результаты расчета энергоемкости накопителя и избыточной электроэнергии рекуперации

При ограничении тока рекуперации	Энергоемкость ЕНЭ, Ф	Избыточная электроэнергия, которую может принять ЕНЭ, и ее стоимость, кВт·ч (грн.)	Избыточная электроэнергия, которую не может принять ЕНЭ, и ее стоимость, кВт·ч (грн.)
Для трех электропоездов	288,70	989,99 (361,15)	2,15 (0,80)
Для двух электропоездов	192,50	956,04 (348,76)	36,10 (13,17)
Для одного электропоезда	96,20	738,97 (269,57)	253,17 (92,36)

ВЫВОДЫ

1. Разработанная методика позволяет рассчитать количество электроэнергии рекуперации в электрифицированном городском транспорте при установке емкостного накопителя электроэнергии на шинах тяговой подстанции. На основании разработанного алгоритма выполнен пример расче-

та для одновременно находящихся четырех поездов на перегоне, который позволил установить, что для заданного режима движения отношение электроэнергии рекуперации к тяге составляет 36,99 %, отношение избыточной электроэнергии к тяге – 14,91 %, необходимая энергоемкость емкостного накопителя электроэнергии – 384,93 Ф.

2. При установке емкостного накопителя электроэнергии ограниченной энергоемкости ($C_{\text{енз}} = 288,7; 192,5$ и $96,2$ Ф) для заданного режима движения отношение избыточной электроэнергии рекуперации к тяге составит соответственно 14,88 %; 14,37 и 11,10 %. Количество запасаемой электроэнергии накопителем уменьшится соответственно на 0,2 %; 3,6 и 25,5 %.

3. Сравнение полученных результатов показывает, что при ограничении энергоемкости накопителя на уровне $C_{\text{енз}} = 288,7$ и $192,5$ Ф количество запасаемой электроэнергии накопителем уменьшается незначительно, в то время как ограничение на уровне $C_{\text{енз}} = 96,2$ Ф приводит к заметному снижению накапливаемой электроэнергии. Количество электроэнергии, рассеиваемой в виде теплоты, при ограничении энергоемкости на уровне $C_{\text{енз}} = 96,2$ Ф существенно увеличивается по сравнению с ограничением на уровне $C_{\text{енз}} = 288,7$ и $192,5$ Ф.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на определение оптимальной энергоемкости при заданном режиме движения электрифицированного городского транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сулим, А. А. Применение емкостных накопителей в электрифицированном рельсовом транспорте / А. А. Сулим // IX Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів: зб. матеріалів конф. – Кременчук: КрНУ, 2011. – 234 с.
2. Хворост, Н. В. Концепция новой структуры системы электрической тяги метрополитена / Н. В. Хворост // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – Харьков: ХГАГХ, 2003. – Вып. № 53. – С. 172–179.
3. Колб, А. А. Использование энергии рекуперации электротранспорта для управления качеством электроэнергии / А. А. Колб // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вып. 4 (63), ч. 1. – С. 98–102.
4. Разработка алгоритма для расчета пусковой силы тяги поезда метрополитена / А. А. Сулим [и др.] // Рейковий рухомий склад: зб. наук. праць. – Кременчук: Вид-во ДП «УкрНДІВ», 2012. – Вып. 6. – С. 20–23.
5. Родькин, Д. И. Особенности осуществления электропривода с накопителями энергии / Д. И. Родькин, Т. В. Величко // Проблемы создания машин и технологий: науч. труды КГПИ. – Кременчук: КГПИ, 2000. – Вып. 2 (9). – С. 124–132.
6. Щуров, Н. И. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги / Н. И. Щуров, К. В. Щеглов, А. А. Штанг // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2008. – № 1 (51). – С. 99–104.
7. Шевлюгин, М. В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии / М. В. Шевлюгин, К. С. Желтов // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 1. – С. 15–20.
8. Экономика электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена / А. А. Сулим [и др.] // X Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів: зб. матеріалів конф. – Кременчук: КрНУ, 2012. – 344 с.
9. Улитин, В. Г. Проблема использования избыточной энергии рекуперации на городском электрическом транспорте / В. Г. Улитин // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – Харьков: ХГАГХ, 2009. – Вып. № 88. – С. 266–271.

10. Писарев, Л. Т. Рекуперативное торможение поездов с использованием энергоёмких конденсаторов / Л. Т. Писарев, Ю. В. Черняк, М. Р. Терованесов // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2009. – № 17. – С. 97–105.

11. Штанг, А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / А. А. Штанг. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 19 с.

REFERENCES

1. Sulim, A. A. (2011) Application of Capacitive Drive in Electrified Track Transport. *IX Mizhnarodna Naukovo-Tekhnichna Konferentsiia Molodikh Uchenikh i Spetsialistiv. Zbirnik Materialiv Konferentsii* [IX International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists. Collection of Conference Materials]. Kremenchuk: Mykhailo Ostohradskiy Kremenchuk National University. 234 p. (in Russian).

2. Vorost, N. V. (2003) Conception of a New Structure of Traction of Subway. *Nauchno-Tekhnicheskii Sbornik "Kommunal'noe Khoziaistvo Gorodov"* [Scientific-Technical ref. Book "Municipal Services of Cities"]. Kharkov, Kharkov National Academy of Municipal Economy, 53, 172–179 (in Russian).

3. Kolb, A. A. (2010) Utilization of Energy Recovery of Electrical Transport for Controlling the Quality of Electrical Power. *Visnik Kremenchuts'kogo Natsional'nogo Universitetu Imeni Mikhaïla Ostrograds'kogo* [Visnik of Mykhailo Ostohradskiy Kremenchuk National University], 4 (63), Part 1, 98–102 (in Russian).

4. Sulim, A. A., Sychev, S. D., Raspopin, V. R., Mel'nik, A. A., & Fedorov, V. V. (2012) Development of Algorithms for Calculation of Starting power of Traction of Subway Train. *Zbirnik Naukovikh Prats' "Reikovii Rukhomii Sklad"* [Ref. Book of Scientific Works "Reikovij Ruhomij Sklad"], 6, 20–23 (in Russian).

5. Rodkin, D. I., & Velichko, T. V. (2000) Peculiarities Realization of Electric Motor and Drives. *Nauchnye Trudy Kostanaiskogo Gosudarstvennogo Pedagogicheskogo Instituta "Problemy Sozdaniia Mashin i Tekhnologii"* [Scientific works Kostanayski State Pedagogical Institute "Problems of Machine Manufacturing and Technologies"]. Kremenchuk: KSPI, 2 (9), 124–132 (in Russian).

6. Schurov, N. I., Scheglov, K. V., & Shtang, A. A. (2008) Application of Energy Storage in Electrical Traction Systems. *Sbornik Nauchnykh Trudov Novosibirskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Ref. Book of Scientific Works Novosibirsk State Technical University], 1 (51), 99–104 (in Russian).

7. Shevlyugin, M. V., & Zeltov, K. S. (2008) Decrease of Power Consumption for Train Movement in Moscow Subway Using Capacitive Drives. *Nauka i Tekhnika Transporta [Science and Engineering of Transport]*, 1, 15–20 (in Russian).

8. Sulim, A. A., Sychev, S. D., Raspopin, V. R., Khozia, P. A., Mel'nik, A. A., & Fedorov, V. V. (2012) Energy Efficiency Using Regenerative Braking In Wagons of Subways. *X Mizhnarodna Naukovo-Tekhnichna Konferentsiia Molodikh Uchenikh i Spetsialistiv. Zbirnik Materialiv Konferentsii* [X International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists. Collection of Conference Materials]. Kremenchuk: Mykhailo Ostohradskiy Kremenchuk National University. 344 p. (in Russian).

9. Ulitin, V. G. (2009) Problems of Using Dump Energy Recovery in Urban Electric Transport. *Nauchno-Tekhnicheskii Sbornik "Kommunal'noe Khoziaistvo Gorodov"* [Scientific-Technical Ref. Book "Municipal Services of Cities"]. Kharkov, Kharkov National Academy of Municipal Economy, 88, 266–271 (in Russian).

10. Pisarev, L. T., Chervjak, Yu. V., & Terovanesov, M. R. (2009) Regenerative Braking of Trains Using Powerful Capacitors. *Zbirnik Naukovikh Prats' Donets'kogo Institutu Zaliznichnogo Transportu* [Scientific Papers of Donetsk Institute of Railway Transport], 17, 97–105 (in Russian).

11. Shtang, A. A. *Povyshenie Effektivnosti Elektrotransportnykh Sistem na Osnove Ispol'zovaniia Nakopitelei Energii. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Efficiency Increasing of Electrotransport Systems on the Base of Drives. *Dis. kand. tekhn. sci.*]. Novosibirsk, 2006. 19 p. (in Russian).