

УДК 621.311.004

ПРОГРАМНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА

А. А. Сулим, А. С. Сиора, П. А. Хозя

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
ул. И. Приходько, 33, г. Кременчуг, 39621, Украина. E-mail: sulim1.ua@gmail.com

Из анализа предыдущих исследований известно, что применение рекуперативного торможения и емкостных накопителей электроэнергии позволит значительно сократить количество потребляемой электроэнергии на электрифицированном городском транспорте. Вопрос оценки потребляемой и рекуперированной электроэнергии без установки емкостного накопителя, а также при его установке на выходе тяговой подстанции или на борту электрифицированного городского транспорта является актуальным и недостаточно изученным. Приведены методики расчетов количества потребляемой и рекуперированной электроэнергии при установке емкостного накопителя на выходе тяговой подстанции и непосредственно на электрифицированном городском транспорте. Установлено, что данные расчеты трудоемки и существует необходимость для их автоматизации, исходя из чего целью данной работы является разработка программного обеспечения для автоматизации расчетов энергии рекуперации электрифицированного городского транспорта. Созданы и рассмотрены специализированные программы, разработанные в среде графического программирования LabVIEW. Показаны графические интерфейсы и описаны функциональные блоки разработанных программ. Проведены расчеты электроэнергии рекуперации при заданных входных данных с использованием предложенных программных обеспечений. На основании построенных диаграмм определено количество потребляемой и рекуперированной электроэнергии.

Ключевые слова: электроэнергия рекуперации, емкостный накопитель, программное обеспечение, интерфейс пользователя.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИФІКОВАНОГО МІСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

А. О. Сулим, О. С. Сіора, П. О. Хозя

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»
вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. E-mail: sulim1.ua@gmail.com

З аналізу попередніх досліджень відомо, що застосування рекуперативного гальмування і емнісних накопичувачів електроенергії дозволить значно скоротити кількість споживаної електроенергії на електрифікованому міському транспорті. Питання оцінки споживаної й рекуперованої електроенергії без установки емнісного накопичувача, а також при його установці на виході тягової підстанції або на борту електрифікованого міського транспорту є актуальним і недостатньо вивченим. У роботі наведено методики розрахунків кількості споживаної й рекуперованої електроенергії при установці емнісного накопичувача на виході тягової підстанції та безпосередньо на електрифікованому міському транспорті. Встановлено, що дані розрахунки трудомісткі й існує необхідність для їх автоматизації, виходячи з чого метою даного дослідження є розробка програмного забезпечення для автоматизації розрахунків енергії рекуперації електрифікованого міського транспорту. Створено та розглянуто спеціалізовані програми, розроблені в середовищі графічного програмування LabVIEW. Показано графічні інтерфейси й описано функціональні блоки розроблених програм. Проведено розрахунки електроенергії рекуперації при заданих вхідних даних із використанням запропонованих програмних забезпечень. На підставі побудованих діаграм визначено кількість споживаної та рекуперованої електроенергії.

Ключові слова: електроенергія рекуперації, емнісний накопичувач, програмне забезпечення, інтерфейс користувача.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Значительную роль в перевозках пассажиров городов играет электрифицированный городской транспорт (ЭГТ), к которому относится и метрополитен [1, 2]. Повышение энергоэффективности на данном виде транспорта остается одной из приоритетных задач [1–4]. Из работ [1, 5] известно, что одним из перспективных способов экономии электроэнергии на ЭГТ является применение рекуперативного торможения. Также установлено, что применение емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) позволит полностью использовать избыточную энергию рекуперации при отсутствии потребителей в сети [2, 5, 6]. Наиболее перспективной, с точки зрения энергоэффективности, является установка ЕНЭ на выходе тяговой подстанции (ТП) и непосредственно на ЭГТ [6–9], одним из важных

вопросов при этом является оценка потребляемой и рекуперированной энергии без установки ЕНЭ, а также при его установке на выходе ТП и на борту ЭГТ. Проведенный анализ показал, что в работах других авторов решению этого вопроса уделено недостаточно внимания [10].

Ранее в работах [10, 11] разработаны методики и алгоритмы расчетов, позволяющие выполнять оценку энергии рекуперации при установке ЕНЭ на выходе ТП и непосредственно на ЭГТ.

Методика расчета для оценки количества электроэнергии рекуперации при установке ЕНЭ на выходе ТП включает этапы вычислений, суть которых рассмотрена ниже.

Оператором задаются параметры, необходимые для расчета количества и стоимости потребляемой,

рекуперуемой и избыточной электроэнергии ЭГТ: N – количество транспортных средств, работающих на перегоне; M – количество транспортных средств, при одновременном торможении которых ЕНЭ может принять избыточную энергию торможения; t – время работы на перегоне за сутки при заданной интенсивности движения; q – стоимость электроэнергии за 1 кВт·час; $U_{кc}$ – напряжение контактной сети в режиме тяги; $U_{емин}$ – минимальное напряжение на накопителе; $U_{емmax}$ – максимальное напряжение на накопителе; m – масса ЭГТ с пассажирами; L – длина перегона.

Задаются данные для двух вариантов:

1) $N=I$: t_{Σ} – общее время движения на перегоне;

$t_{тяги}$ – продолжительность режима тяги; $t_{рек}$ – продолжительность режима рекуперации; k – количество включений контроллера машиниста (КМ); n – количество включений КМ в режиме рекуперации; I_k, I_n – средние значения токов в режиме тяги и рекуперации;

2) $N>I$: $t_{\Sigma 1}, t_{\Sigma 2}$ – общее время движения на перегоне в попутном и обратном направлениях; $t_{тяги1}, t_{тяги2}, t_{рек1}, t_{рек2}$ – продолжительность режима тяги и рекуперации при движении в попутном и обратном направлениях; $U_{рек}$ – напряжение на токоприемнике в режиме рекуперации; k, n – количество включений КМ в режим тяги и рекуперации; I_k, I_n – средние значения токов в режиме тяги и рекуперации.

Рассчитываются средние значения токов в режимах тяги и рекуперации при условии $k>I$ и $n>I$ по выражениям

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

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

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

для случая $N = I$

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

для случая $N \geq 2$

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

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

Строится матрица в зависимости от заданной интенсивности движения на перегоне.

Вычисляются вероятности возникновения режимов для каждой строки матрицы по выражению [12]

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

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 реку-

перации для каждой строки матрицы:

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

$$I_{рек} = I_{ср.рек} b. \quad (8)$$

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

Осуществляется расчет для каждой строки матрицы общего времени работы по выражению

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

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

$$B = I_{тяги} t; \quad (10)$$

$$C = I_{рек} t; \quad (11)$$

$$D = I_{изб.рек} t. \quad (12)$$

Выполняется расчет электроэнергии потребления и рекуперации (рекуперуемой в сеть и избыточной), а также ее стоимость за общее время работы по выражениям [10, 12]:

$$W_{тяги} = \frac{\Sigma B U_{кc}}{3600 \cdot 10^3}; \quad (13)$$

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

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

$$Q_{тяги} = W_{тяги} q; \quad (16)$$

$$Q_{рек} = W_{рек} q; \quad (17)$$

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

Осуществляется расчет средней мощности потребления и рекуперации:

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

Вычисляются отношения электроэнергии рекуперации к электроэнергии потребления:

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

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

Выполняется расчет удельной электроэнергии потребления и рекуперации (рекуперуемой в сеть и избыточной) по выражениям [12]:

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

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

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

Определяется необходимая энергоемкость нако-

пителя електроенергії при заданій інтенсивності руху по вираженню [6]

$$C_{енз} = \frac{2I_{ср.рек} NU_{рек} t_{рек}}{U_{енмакс}^2 - U_{енмін}^2}. \quad (25)$$

Перевірка умови « $N > M$?»: якщо умова виконується, тоді здійснюється розрахунок необхідної ємності, щоб прийняти електроенергію рекуперації від M поїздів. В протилежному випадку розрахунок закінчується.

Розрахунок необхідної енергоємності накопичувача електроенергії, щоб прийняти електроенергію рекуперації від M поїздів, визначається по вираженню (25). Особливістю цього розрахунок від попереднього є те, що замість заданого N підставляється значення M .

Методика розрахунок для оцінки кількості електроенергії рекуперації при встановці ЕНЗ безпосередньо на ЕГТ включає етапи вирахувань, суть яких розглянута нижче.

Оператором задаються параметри, необхідні для розрахунок електроенергії рекуперації при встановці накопичувача на електропоїзд: кількість змін режимів руху поїзда (K), енергоємність встановленого накопичувача (A), режим руху на лінії в вигляді стовпчиків таблиці («1», «0», «-1», де «1» – режим тяги, «0» – режим вибігу, «-1» – режим рекуперативного гальмування), тривалість для кожного режиму руху електропоїзда ($t_{1...k}$), середній струм для кожного режиму руху електропоїзда ($I_{ср1...k}$), середнє напруження на шині вагона кожного режиму руху електропоїзда ($U_{ср1...k}$), вартість електроенергії за 1 кВт·год (q), мінімальне напруження на ЕНЗ ($U_{енмін}$), максимальне напруження на ЕНЗ ($U_{енмакс}$).

Розраховується кількість електроенергії в залежності від режиму руху електропоїзда метрополітена в режимах тяги, вибігу або рекуперації по вираженням:

$$A_{тяги} = \frac{I_{ср} U_{ср} t_{тяги}}{3600 \cdot 1000}; \quad (26)$$

$$A_{выбега} = \frac{I_{ср} U_{ср} t_{выбега}}{3600 \cdot 1000}; \quad (27)$$

$$A_{рек} = \frac{I_{ср} U_{ср} t_{рек}}{3600 \cdot 1000}, \quad (28)$$

де $t_{тяги}$ – тривалість режиму тяги; $t_{выбега}$ – тривалість режиму вибігу; $t_{рек}$ – тривалість режиму рекуперативного гальмування.

Записуються результати розрахунок кількості електроенергії для кожного режиму ведення поїзда в вигляді стовпчиків таблиці: $A_{потр}$, $A_{потр.нак}$, $A_{нак.рек}$ і $A_{изб.рек}$. Таблиця вихідних даних складається з наступних стовпчиків: енергія спожиття без застосування накопичувача – $A_{потр}$, енергія спожиття з застосуванням накопичувача – $A_{потр.нак}$, накопичена енергія – $A_{нак.рек}$ і надлишкова енергія при рекуперативному гальмуванні – $A_{изб.рек}$. Більш детально методика заповнення таблиці вихідних даних описана в роботі [11].

Здійснюються розрахунок загальної електроенергії спожиття і рекуперації, а також її вартості для заданого режиму руху електропоїзда. Вартість електроенергії, яка споживається без урахування і з урахуванням накопичувача, вартість електроенергії, яка зберігається в накопичувачі, і вартість надлишкової електроенергії визначається по вираженням

$$Q_{потр} = A_{потр} q; \quad (29)$$

$$Q_{потр.нак} = A_{потр.нак} q; \quad (30)$$

$$Q_{нак.рек} = A_{нак.рек} q; \quad (31)$$

$$Q_{изб.рек} = A_{изб.рек} q. \quad (32)$$

Здійснюється розрахунок енергоємності накопичувача з урахуванням заданого кількості електроенергії, яку може зберегти накопичувач, по вираженню [6]

$$C_{ен} = \frac{2A}{U_{енмакс}^2 - U_{енмін}^2}. \quad (33)$$

Визначається максимальне значення надлишкової електроенергії за час заданого режиму руху електропоїзда метрополітена, $A_{макс}$.

Розраховується необхідна енергоємність накопичувача з урахуванням накоплення надлишкової кількості електроенергії [6]:

$$C_{енмакс} = \frac{2(A + A_{макс})}{U_{енмакс}^2 - U_{енмін}^2}. \quad (34)$$

Слід зауважити, що ці розрахунок є трудомісткими і їх реалізація вручну призводить до виникнення помилок. Автоматизація розрахунок дозволить звести до мінімуму кількість помилок, викликаних людським фактором, а також скоротити час отримання результатів.

Крім того, при експлуатації ЕГТ часто змінюються умови інтенсивності руху в час доби і режим руху в залежності від профілю шляху на перегоні. Як наслідок, необхідно проводити окремі розрахунок при зміні умов. Таким чином, для багаторазового виконання розрахунок актуальним є їх автоматизація.

Метою цієї роботи є розробка програмного забезпечення для автоматизації розрахунок електроенергії рекуперації електрифікованого міського транспорту.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В умовах Державного підприємства «Український науково-дослідницький інститут вагостроєння» (ГП «УкрНИИВ») для автоматизації розрахунок енергії рекуперації розроблені програми «Енергія на підстанції» і «Енергія на електроподвижном складі (ЕПС)». Програма «Енергія на підстанції» використовується для оцінки спожитої, рекуперованої в мережу і накопленої електроенергії при встановці ЕНЗ на ТП. Програма «Енергія на ЕПС» – для оцінки спожитої, рекуперованої в накопичувач і надлишкової електроенергії при встановці ЕНЗ безпосередньо на ЕГТ.

Програми розроблені в середовищі графічного

программирования LabVIEW, главными преимуществами которой являются: возможность реализации алгоритмов высокого уровня сложности, наглядность и простота освоения, наличие удобного гра-

фического интерфейса.

Внешний вид графических интерфейсов оператора разработанных программ представлен на рис. 1, 2.

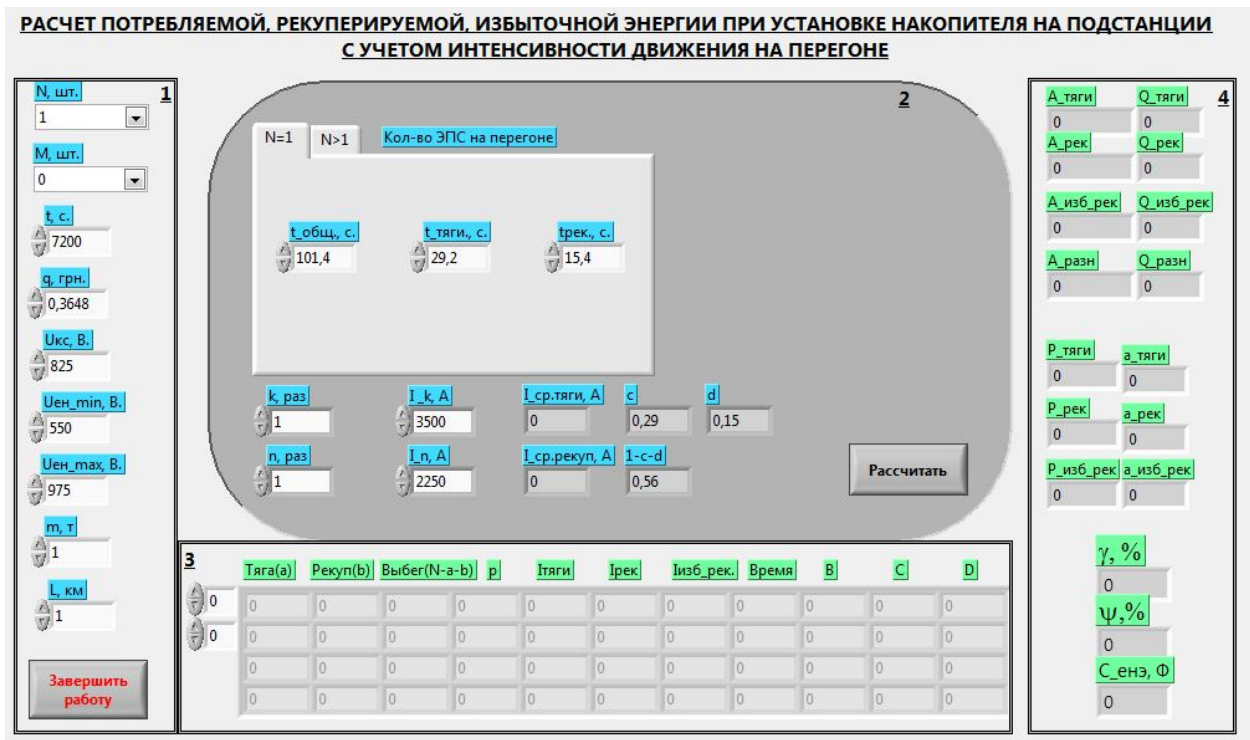


Рисунок 1 – Внешний вид графического интерфейса программы «Энергия на подстанции»

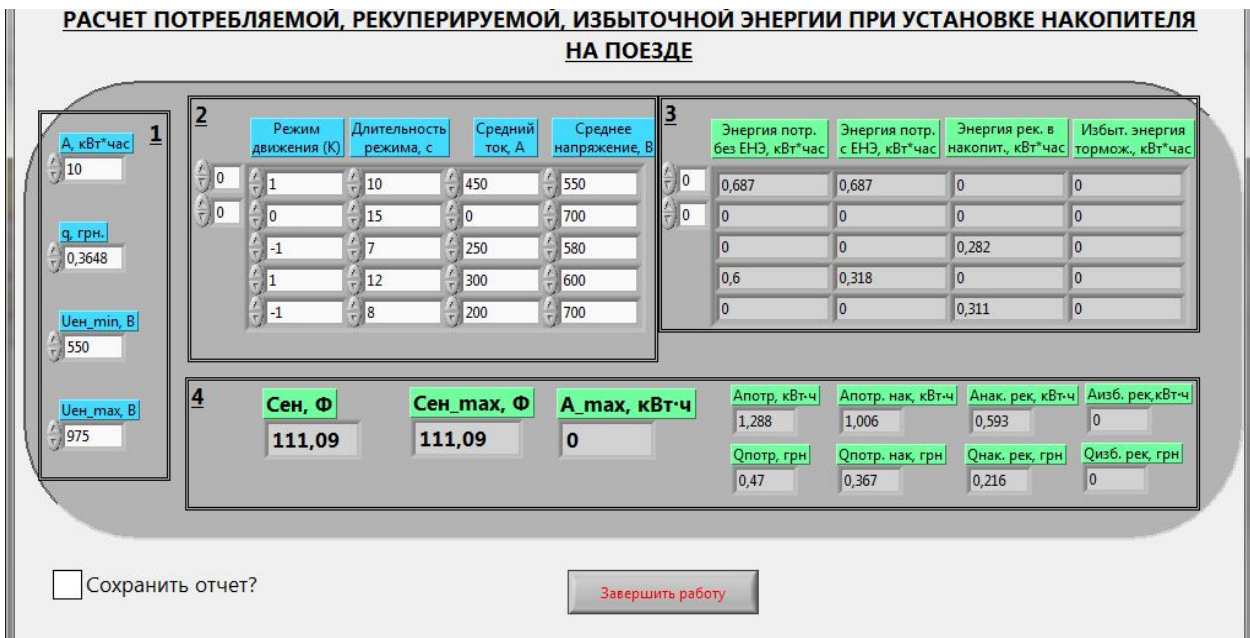


Рисунок 2 – Внешний вид графического интерфейса программы «Энергия на ЭПС»

Интерфейс оператора программы «Энергия на подстанции» (рис. 1) включает цифровые регуляторы и индикаторы, объединенные в условные группы по логическому содержанию. Так, можно выделить блок входных параметров 1, блок задания количества ЭПС на перегоне 2, блок промежуточных вычис-

лений 3 в виде матрицы, блок рассчитанных параметров 4.

В блоке входных параметров 1 задаются ранее распланные параметры. В блоке 2 задаются данные для двух вариантов (N=1; N>1) и выводятся результаты расчетов следующих параметров: $I_{ср.тяги}$; $I_{ср.рек}$;

c; d и 1–с–d. В блоке 3 представляются результаты промежуточных вычислений в виде матрицы. Параметры матрицы описаны при изложении методики расчетов. В блоке 4 приводятся результаты рассчитанных выходных параметров.

Программный модуль выполняет математические вычисления автоматически по алгоритму, приведенному в [10].

В работе [10] в качестве примера выполнен расчет количества и стоимости потребляемой, рекуперированной и избыточной энергии, а также необходи-

мой емкости накопителя при следующих входных данных: $N=4$; $t=7200$ с; $q=0,3648$ грн./кВт; $U_{кв}=825$ В; $U_{ем\min}=550$ В; $U_{ем\max}=975$ В; $m=246,88$ т; $L=0,727$ км; $t_{\Sigma 1}=101,4$ с; $t_{\Sigma 2}=101,4$ с; $t_{мягу1}=29,2$ с; $t_{мягу2}=29,2$ с; $t_{рек1}=15,4$ с; $t_{рек2}=15,4$ с; $U_{рек}=900$ В; $k=1$; $n=1$; $I_{ср.мягу}=3500$ А; $I_{ср.рек}=2250$ А. Аналогичные входные данные использованы для расчетов с помощью программы «Энергия на подстанции».

Результаты выполненных в программе «Энергия на подстанции» расчетов приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1 – Результаты промежуточных вычислений при установке ЕНЭ на ТП

Тяга, a	Рекуп., b	Выбег, $N-a-b$	p	$I_{тягу}$ А	$I_{рек}$ А	$I_{изб.рек}$ А	t , с	B , А·с	C , А·с	D , А·с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
«4»	«0»	«0»	0,0069	14000	0	0	49,51	693170,6	0	0
«3»	«1»	«0»	0,0145	10500	2250	0	104,45	1096729	235013	0
«3»	«0»	«1»	0,0535	10500	0	0	385,25	4045078	0	0
«2»	«2»	«0»	0,0115	7000	4500	0	82,63	578411,8	371836	0
«2»	«1»	«1»	0,0847	7000	2250	0	609,53	4266726	1371448	0
«2»	«0»	«2»	0,1561	7000	0	0	1124,1	7868507	0	0
«1»	«3»	«0»	0,004	3500	6750	3250	29,05	101684,3	196105	94421
«1»	«2»	«1»	0,0446	3500	4500	1000	321,5	1125130	1446595	321466
«1»	«1»	«2»	0,1647	3500	2250	0	1185,7	4149829	2667747	0
«1»	«0»	«3»	0,2025	3500	0	0	1457,7	5101954	0	0
«0»	«4»	«0»	0,0005	0	9000	9000	3,83	0	34475	34475
«0»	«0»	«4»	0,0985	0	0	0	708,9	0	0	0
«0»	«3»	«1»	0,0078	0	6750	6750	56,51	0	381465	381465
«0»	«2»	«2»	0,0434	0	4500	4500	312,7	0	1406963	1406963
«0»	«1»	«3»	0,1068	0	2250	2250	768,8	0	1729772	1729772
«0»	«0»	«4»	0,0985	0	0	0	708,9	0	0	0

Таблица 2 – Результаты расчетов выходных параметров при установке ЕНЭ на ТП

№ п/п	Название параметра	Обозначение параметра	Выходные данные
1	Среднее значение потребляемой мощности в режиме тяги, кВт	$P_{тяги}$	3326,04
2	Среднее значение мощности в режиме рекуперации, кВт	$P_{рек}$	1230,18
3	Среднее значение избыточной мощности, кВт	$P_{изб.рек}$	496,07
4	Удельная энергия потребления, Вт·час/т·км	$a_{тяги}$	130,5
5	Удельная рекуперированная в сеть энергия, Вт·час/т·км	$a_{рек}$	48,26
6	Удельная избыточная энергия, Вт·час/т·км	$a_{изб.рек}$	19,46
7	Общая потребляемая электроэнергия, кВт·час	$A_{тяги}$	6652,07
8	Общая стоимость потребляемой электроэнергии, грн.	$Q_{тяги}$	2426,68
9	Общая рекуперированная электроэнергия, кВт·час	$A_{рек}$	2460,36
10	Общая стоимость потребляемой электроэнергии, грн.	$Q_{рек}$	897,54
11	Общая избыточная электроэнергия, кВт·час	$A_{изб.рек}$	992,14
12	Общая стоимость избыточной электроэнергии, грн.	$Q_{изб.рек}$	361,93
13	Разница между рекуперированной и избыточной электроэнергией, кВт·час	$A_{разн.}$	1468,21
14	Стоимость разницы электроэнергии, грн.	$Q_{разн.}$	535,61
15	Отношение $A_{рек}$ к $A_{тяги}$, %	γ	36,99
16	Отношение $A_{изб.рек}$ к $A_{тяги}$, %	Ψ	14,91
17	Емкость накопителя, Ф	$C_{енэ}$	384,93

Интерфейс оператора программы «Энергия на ЭПС» (рис. 2) состоит из набора цифровых регуляторов для ввода параметров расчета и индикаторов для отображения результатов расчета. Элементы интерфейса, сгруппированные по логическому содержанию, объединены в следующие группы: входные параметры 1, массив входных значений 2, массив промежуточных вычислений 3, выходные параметры 4.

В блоке входных параметров 1 задаются следующие показатели: A ; q ; $U_{ентmin}$; $U_{ентmax}$. В массиве входных значений 2 задаются следующие показатели: K ; режим движения на линии в виде столбцов таблицы («1», «0», «-1»); $t_{1...K}$; $I_{ср1...K}$; $U_{ср1...K}$.

Массив промежуточных вычислений 3 состоит из следующих столбцов: $A_{потр}$ – энергия, потребляемая в режиме тяги без ЕНЭ; $A_{потр.нак}$ – энергия, потребляемая в режиме тяги с применением ЕНЭ; $A_{нак.рек}$ – накопленная энергия в ЕНЭ; $A_{изб.рек}$ – избыточная энергия при рекуперативном торможении.

В блоке 4 приводятся результаты рассчитанных выходных параметров: $C_{ентmax}$; $C_{ен}$; A_{max} ; $A_{потр}$;

$A_{потр.нак}$; $Q_{потр}$; $Q_{потр.нак}$; $A_{нак.рек}$; $A_{изб.рек}$; $Q_{нак.рек}$; $Q_{изб.рек}$

Программный модуль выполняет математические вычисления автоматически по алгоритму, приведенному в [11].

В работе [11] 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./кВт; $U_{ентmin}=550$ В; $U_{ентmax}=975$ В; $A=10$ кВт·час. Количество режимов движения получено путем моделирования движения поезда метрополитена по графику между тремя станциями. Данные для каждого режима движения поезда приведены в [11]. Аналогичные входные данные использованы для расчетов с помощью программы «Энергия на ЭПС».

Результаты выполненных в программе «Энергия на ЭПС» расчетов приведены в табл. 3, 4.

Таблица 3 – Результаты промежуточных вычислений при установке ЕНЭ на ЭГТ

К	Энергия, потребляемая без ЕНЭ, кВт·час	Энергия, потребляемая с ЕНЭ, кВт·час	Накопленная энергия в ЕНЭ, кВт·час	Избыточная энергия, кВт·час	К	Энергия, потребляемая без ЕНЭ, кВт·час	Энергия, потребляемая с ЕНЭ, кВт·час	Накопленная энергия в ЕНЭ, кВт·час	Избыточная энергия, кВт·час
1	16,55	16,55	0	0	9	6,5	6,5	0	0
2	0	0	0	0	10	0	0	0	0
3	3,1	3,1	0	0	11	0	0	9,23	0
4	0	0	0	0	12	0	0	0	0
5	0	0	10	2,43	13	12	2,77	0	0
6	0	0	0	0	14	0	0	0	0
7	18,23	8,23	0	0	15	0	0	9,96	0
8	0	0	0	0	16	0	0	0	0

Таблица 4 – Результаты расчетов выходных параметров при установке ЕНЭ на ЭГТ

№ п/п	Название параметра	Обозначение параметра	Выходные данные
1	Максимальная емкость накопителя, Ф	$C_{ентmax}$	138,1
2	Емкость накопителя, Ф	$C_{ен}$	111,09
3	Максимальная избыточная энергия торможения, кВт·час	A_{max}	2,43
4	Общая потребляемая энергия без ЕНЭ, кВт·час	$A_{потр}$	56,38
5	Общая стоимость потребляемой электроэнергии без ЕНЭ, грн.	$Q_{потр}$	20,57
6	Общая потребляемая электроэнергия с ЕНЭ, кВт·час	$A_{потр.нак}$	37,15
7	Общая стоимость потребляемой электроэнергии с ЕНЭ, грн.	$Q_{потр.нак}$	13,55
8	Общая накопленная в ЕНЭ электроэнергия, кВт·час	$A_{нак.рек}$	29,19
9	Общая стоимость накопленной электроэнергии в ЕНЭ, грн.	$Q_{нак.рек}$	10,65
10	Общая избыточная электроэнергия, кВт·час	$A_{изб.рек}$	2,43
11	Общая стоимость избыточной электроэнергии, грн.	$Q_{изб.рек}$	0,89

Для выполнения расчетов в программах необходимо ввести либо изменить входные параметры, после чего нажать логический переключатель «Рассчитать». Результаты расчетов могут быть сохранены в формате MS Excel. Для сохранения результатов расчетов необходимо установить флаг в окне «Сохранить отчет?». Для завершения работы и выхода из программы необходимо нажать логический переключатель «Завершить работу».

Программы имеют максимально упрощенный графический интерфейс, что обеспечивает работу с ними оператора без специальной подготовки. Работа с программами организована таким образом, что оператор лишен возможности модифицировать программный код.

Из анализа полученных результатов расчетов (рис. 3, 4) видно следующее:

– при установке ЕНЭ на ТП энергия рекуперации составляет 36,99 % от потребляемой из сети, рекуперированная электроэнергия в сеть без применения ЕНЭ – 22,08 %, накапливаемая в ЕНЭ – 14,91 % (рис. 3);

– при установке ЕНЭ на ЭГТ заданной энергоемкости, равной 10 кВт·час, количество потребляемой электроэнергии из сети уменьшится на 34,1 %, количество избыточной электроэнергии – на 92,3 % (рис. 4) при условии отсутствия потребителя в контактной сети.

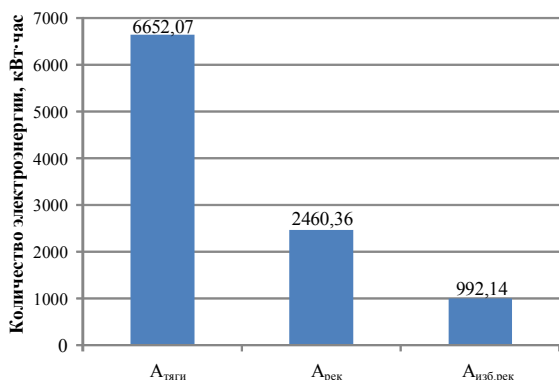


Рисунок 3 – Диаграмма потребляемой, рекуперированной и избыточной (накапливаемой в ЕНЭ) электроэнергии при установке накопителя на ТП

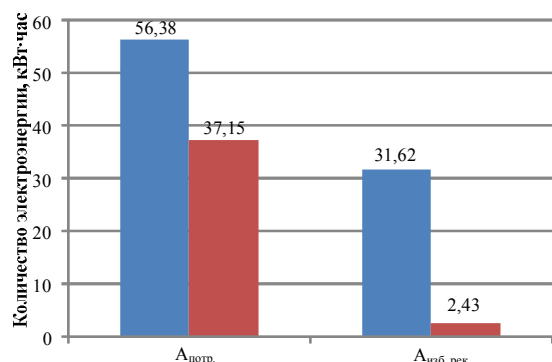


Рисунок 4 – Диаграмма потребляемой и избыточной электроэнергии без накопителя и с применением накопителя заданной энергоемкости (A=10 кВт·час) при его установке на ЭГТ

ВЫВОДЫ. Разработанное программное обеспечение с понятным графическим интерфейсом позволяет рассчитать количество потребляемой и рекуперированной электроэнергии при установке ЕНЭ на ТП и непосредственно на ЭГТ. Как итог, данные программы позволяют значительно сократить время получения результатов расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Донченко А.В., Сулим А.О. До питання витрат електроенергії на тягу вагонів метрополітену КП «Київський метрополітен» // Збірн. наук. праць ДЕТУТ «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2013. – Вип. 22. – С. 5–8.
2. Шевлюгин М.В., Желтов К.С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии // Наука и техника транспорта. – М.: 2008. – Вып. 1. – С. 15–20.
3. Закон України від 29.06.2004 року № 1914-IV «Про міський електричний транспорт».
4. Розпорядження Кабінету міністрів України від 28 грудня 2011 р. № 1361-р «Про схвалення Концепції Державної цільової програми будівництва та розвитку мережі метрополітенів на період до 2020 року».
5. Колб А.А. Аккумуляция энергии рекуперации электрифицированного транспорта с помощью емкостных энергонакопителей // Вісник Дніпропетровського національного університету ім. академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 31. – С. 89–94.
6. Щуров Н.И., Щеглов К.В., Штанг А.А. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – Вып. 1/2008 (51). – С. 99–104.
7. Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро // Электронный журнал «Энергосовет». – Петрозаводск, 2011. – Вып. 3/2011 (16). – С. 74–76.
8. Шевлюгин М.В. Повышение энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения железных дорог с помощью накопителей энергии // Наука и техника транспорта. – М., 2007. – Вып. 1. – С. 68–72.
9. Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Невезак В.Л. Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта». – 2013. – Вып. 2/2013 (6). – С. 48–52.
10. Сулим А.А. Расчет электроэнергии рекуперации электрифицированного городского транспорта при установке накопителя на тяговой подстанции // Научно-технический и производственный журнал «Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика». – Минск: БНТУ, 2014. – Вып. 4/2014, часть 4. – С. 30–41.
11. Сулим А.А., Ломонос А.И. Расчет энергии

рекуперации при установке накопителя на электропоезде метрополитена // Збірн. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2013. – Вип. 23. – С. 22–29.

12. Улитин В.Г. Проблема использования избы-

точной энергии рекуперации на городском электрическом транспорте // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – Харьков, ХГАГХ, 2009. – Вип. 88. – С. 266–271.

SOFTWARE FOR AVTOMATION OF ELECTRIC POWER CALCULATION RECUPERATION OF ELECTRIFIED URBAN TRANSPORT

A. Sulim, A. Siora, P. Hozya

State Enterprise «Ukrainian Research Car Building-Institute»

ul. I. Prikhodko, 33, Kremenchug, 39621, Ukraine. E-mail: sulim1.ua@gmail.com

From the analysis of previous researches it is known that the use of recuperation braking and capacitive energy storage power will allow significantly reduce the amount of electricity consumed at the electrified urban transport. The question of assessment power consumption and the recuperated without installing capacitive storage, as well as when it is mounted on the output of traction substation or on board the electrified urban transport is relevant and understudied. Methods of calculations of the amount of consumed and recuperated energy when installing storage capacitor at the output of traction substation and directly at the electrified public transport are given. It is established that these calculations are time taking and it is necessary to automate them. On that basis, the purpose of this article is development of software to automate the calculations of the energy of recuperation of electrified urban transport. Specialized programs, developed in graphical programming environment LabVIEW were created and reviewed. Graphic interfaces were presented and functional units of developed programs were characterized. Calculations of regenerated electric power under given input data using proposed software were made. On the basis of the constructed diagrams defined amount of electricity consumed and recuperated.

Key words: energy recovery, capacitive storage, software, inter-face of the user.

REFERENCES

1. Donchenko, A.V. and Sulim, A.A. (2013), "The issue of power consumption for traction subway cars Kyiv metro", *Zbirnyk naukovykh prats DETUT*, no. 22, pp. 5–8. (in Ukrainian)
2. Shevlyugin, M.V. and Zheltov, K.S. (2008), "The reduction of power consumption for the movement of trains in the Moscow metro when using capacitive energy storage", *Nauka i tehnika transporta*, no. 1, pp. 15–20. (in Russian)
3. The law of Ukraine dated 29.06.2004, N 1914–IV "On urban electric transport". (in Russian)
4. The order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 28 December 2011, No. 1361–R "On approval of the Concept of the State target program of construction and development of metro network for the period till 2020". (in Russian)
5. Kolb, A.A. (2010), "The accumulation of energy recovery electrified transport using capacitive power stores", *Visnyk Dnipropetrovskogo natsionalnogo universitetu im. akademika V. Lazaryna*, no. 31, pp. 89–94. (in Russian)
6. Shchurov, N.I. Shcheglov, K.V. and Shtang, A.A. (2008), "The use of energy storage systems of electric traction", *Zbirnyk naukovykh prats NGTU*, Vol. 1, no. 51, pp. 99–104. (in Russian)
7. Bychkova, M.P. (2011), "System of energy storage for energy efficiency in the subway", *Energosovet*, Vol. 3, no. 16, pp. 74–76. (in Russian)
8. Shevlyugin, M.V. (2007), "Improving the energy performance of the traction electric Railways with energy storage", *Nauka i tehnika transporta*, no. 1, pp. 68–72. (in Russian)
9. Cheremisin, V.T., Nikiforov, M.M. and Nevezak, V.L. (2013), "The choice of installation sites of the drive power ground DC according to the criterion of efficiency", *Nauka i transport. Modernizatsiya zheleznodorozhnogo transporta*, Vol. 2, no. 6, pp. 48–52. (in Russian)
10. Sulim, A.A. (2014), "The calculation of the energy recovery electrified transport when installing the drive on traction substation", *Nauchno-tehnicheskyy zhurnal "Izvestiya vycshykh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obyedineniy SNG. Energetica"*, Vol. 4, pp. 30–41. (in Russian)
11. Sulim, A.A. and Lomonos, A.I. (2013), "The calculation of the energy recovery when installing the drive on the subway train", *Zbirnyk naukovykh prats DETUT*, no. 23, pp. 22–29. (in Russian)
12. Ulitin, V.G. (2009), "The problem of using the excess power on the urban electric transport", *Nauchno-tehnicheskyy sbornik "Kommunalnoe hozaystvo gorodov"*, no. 88, pp. 266–271. (in Russian)

Стаття надійшла 06.09.2014 р.