

УДК 629.472.3

О. С. АНАНЬЕВА, старший преподаватель, В. Н. ПОДОЛЬСКАЯ, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Представлена методика расчета переходных процессов, возникающих при совместной работе системы тягового электро-снабжения метрополитена и электрического подвижного состава с накопителями электрической энергии. Рассматриваются возможные варианты подключения аккумулирующей установки в тяговых сетях метрополитена для выбранного расчетного участка. Определено влияние места размещения на процессы заряда-разряда накопителей, размещенных в системе электро-снабжения метрополитена. Приведены результаты расчетов напряжений и токов заряда-разряда при различных местах расположения аккумулирующей установки и представлены выводы о том, что полученная методика может быть использована при расчете систем тягового электро-снабжения.

Городской электрический транспорт, в частности метрополитен, играет ключевую роль в перевозке пассажиров. В условиях увеличения спроса на перевозки, роста цен на энергоносители при сохранении высоких требований к качеству предоставляемых услуг приоритетной задачей становится повышение энергоэффективности данного вида транспорта. Одним из перспективных направлений в решении данной проблемы является использование энергоемких накопителей электрической энергии (НЭЭ). Использование НЭЭ в различных устройствах и системах городского электро-снабжения разнообразно и область их применения с каждым днем расширяется.

Большой вклад в развитие и применение НЭЭ в системах тягового электро-снабжения (СТЭ) внесли такие ученые, как Бродский Ю. А., Глебов И. А., Заруцкая Т. А., Клинов В. Ю., Подаруев А. И., Пупынин В. Н., Шевлюгин М. В. и многие другие. В своих работах они исследовали три основных вопроса: выбор оптимального типа накопителя энергии (НЭ), его массогабаритные и стоимостные показатели, а также выбор рационального места установки накопительных устройств.

На данный момент возможны следующие варианты размещения аккумулирующих устройств: тяговая подстанция (ТП); выводы питающих линий ТП; вдоль контактной сети на межподстанционной зоне; остановочные пункты на перегонах между ТП; тяговый электро-подвижной состав (ТЭПС). Выбор рационального места подключения НЭЭ главным образом зависит от технико-экономической эффективности и удобства при эксплуатации оборудования.

В работе [1] представлен анализ основных схемных решений по обоснованию рационального места расположения емкостных накопителей энергии в системе тягового электро-снабжения (СТЭ) метрополитена. Авторы делают предположение, что в результате размещения накопителя на шинах ТП снижается потребление СТЭ энергии из первичной питающей сети, сглаживаются пики нагрузки ТП, дополнительно уменьшаются потери в первичной питающей сети понижающего и преобразовательного трансформаторов. При размещении НЭЭ на остановочных пунктах общая установленная мощность аккумулирующей установки увеличивается, накопление и возврат энергии посредством реку-

перации поездов осуществляется в непосредственной близости к остановочным пунктам, практически минуя тяговую сеть (ТС), благодаря чему появляется дополнительная экономия – снижение потерь в ТС. В работе [2] авторы оценивают целесообразность и эффективность применения НЭЭ на постах секционирования железных дорог постоянного тока. В результате проведенных авторами исследований был сделан вывод о том, что применение НЭЭ позволяет увеличивать средний уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) и снижает эффективные токи ТП, что в свою очередь способствует увеличению пропускной и провозной способности участка железной дороги.

Опубликованные работы демонстрируют возможность применения НЭЭ непосредственно на ЭПС, что с экономической точки зрения является наиболее эффективным и перспективным способом экономии электрической энергии. Например, в работе [3] автор доказывает, что при размещении НЭЭ на ЭПС упрощается прием энергии рекуперации, часть пускового тока будет потребляться непосредственно из накопителя, что позволяет значительно снизить потери в ТС. Помимо этого появляется возможность аварийного вывода вагонов метрополитена из туннеля при полном или частичном снятии напряжения на ТП, а также при возникновении аварийных режимов в контактной сети.

В приведенных выше работах не описаны методики расчета процессов заряда-разряда НЭЭ, возникающие при совместной работе электрического подвижного состава (ЭПС) метрополитена и СТЭ.

Целью данной работы является разработка методики, которая позволит выполнять анализ процессов заряда-разряда НЭЭ при совместной работе СТЭ и ЭПС метрополитена в различных режимах.

Устройство СТЭ метрополитена весьма сложное, поэтому методика расчета будет показана на примере межподстанционной зоны однопутного участка. Возможные варианты подключения НЭЭ в ТС метрополитена для расчетного участка могут быть изображены одной электрической схемой замещения, представленной на рисунке 1. Данная схема содержит две тяговые подстанции (ТП1, ТП2), одну единицу подвижного состава и аккумулирующую установку на базе суперконденсаторных батарей.

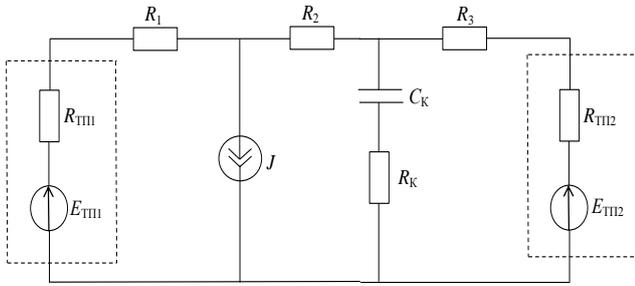


Рисунок 1 – Эквивалентная схема замещения совместной работы ЭПС и СТЭ с НЭЭ

На рисунке 1  $E_{ТП1}$ ,  $E_{ТП2}$  – эквивалентные ЭДС первой и второй тяговых подстанций;  $R_{ТП1}$ ,  $R_{ТП2}$  – эквивалентное внутреннее сопротивление первой и второй тяговых подстанций;  $R_1$  – сопротивление участка контактной сети от ТП<sub>1</sub> до места потребления тока подвижным составом, находящимся в режиме тяги;  $J$  – суммарный ток тяговых двигателей поезда метрополитена, находящегося в режиме тяги;  $R_2$  – сопротивление участка цепи контактной сети от ТП<sub>1</sub> до места подключения НЭЭ к контактной сети;  $R_3$  – сопротивление участка контактной сети от места подключения НЭЭ до ТП<sub>2</sub>;  $R_K$  – внутреннее сопротивление НЭЭ;  $C_K$  – емкость аккумулирующей установки.

Данные для исследования были взяты из тяговых расчётов, проводимых сотрудниками кафедры «Локомотивы» Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТ) для Минского метрополитена [4]. В качестве сведений для производства тяговых расчетов были приняты тяговые и скоростные характеристики вагонов моделей 81-717.5 и 81-714.5.

Ниже представлен ряд допущений для схемы замещения, представленной на рисунке 1:

1 Эквивалентное внутреннее сопротивление подстанции, Ом, определяется по выражению [5, с. 162]

$$R_{ТП} = \frac{U_{d0расч}}{I_{dном}} \left[ A \left( \frac{U_K}{100n_{раб}} + \frac{S_{ном}}{S_K} \right) + \frac{\Delta P_M}{100} \right] + R_a + R_{01}, \quad (1)$$

где  $U_{d0расч}$  – расчетное напряжение холостого хода преобразователей тяговой подстанции, В;  $I_{dном}$  – номинальный ток преобразователя, А;  $A$  – коэффициент наклона внешней характеристики выпрямителя (для используемых на метрополитене схем звезда – две обратные звезды с уравнительным реактором и трехфазная мостовая);  $U_K$  – напряжение короткого замыкания, В;  $n_{раб}$  – число работающих преобразователей на подстанции;  $S_{ном}$  – мощность первичной обмотки преобразовательного трансформатора, кВ·А;  $S_K$  – мощность к.з. на шинах питающего напряжения тяговой подстанции, кВ·А;  $\Delta P_M$  – активные потери в обмотках трансформатора при номинальном режиме (в процентах к номинальной мощности агрегата), Вт;  $R_a$  – активное сопротивление питающей системы, приведенное к стороне выпрямленного тока, Ом;  $R_{01}$  – сопротивление отсасывающей линии, Ом.

2 Сопротивление контактной сети, Ом, от ТП<sub>1</sub> до места потребления тока подвижным составом

$$R_1 = l_1 R_0, \quad (2)$$

где  $l_1$  – путь, прошедший подвижной составом от ТП<sub>1</sub> под током за период  $\Delta t$ , км;  $R_0$  – сопротивление контактной сети, Ом/км.

3 Сопротивление участка контактной сети, Ом, от ТП<sub>1</sub> до места подключения НЭЭ к контактной сети

$$R_2 = x R_0, \quad (3)$$

где  $x$  – длина участка контактной сети от ТП<sub>1</sub> до места подключения НЭЭ, км.

4 Сопротивление участка контактной сети, Ом, от места подключения НЭЭ до ТП<sub>2</sub>

$$R_3 = R_0(L - x), \quad (4)$$

где  $L$  – длина участка контактной сети от ТП<sub>1</sub> до ТП<sub>2</sub>, км.

5 Ускорение и сила тяги электроподвижного состава при движении по заданному участку межподстанционной зоны примем постоянной:

$$a = \text{const}, F_T = \text{const}.$$

6 Суммарный ток тяговых двигателей, потребляемый подвижным составом метрополитена, находящимся в режиме тяги, изменяется в соответствии с проведенными тяговыми расчетами и является функцией времени

$$J_{ПС} = f(t).$$

Расчет проводился по параметрам накопительной установки типа 4·57·10ЭК303, основные характеристики которой приведены в таблице 1 [6].

Таблица 1 – Основные параметры НЭЭ

| Тип системы  | 4·57·10ЭК303  |
|--|---------------|
| Диапазон рабочих напряжений, В                         | 900–450       |
| Емкость, Ф   | 420           |
| Полная запасаемая энергия, МДж                         | 170           |
| Запасаемая энергия в диапазоне рабочих напряжений, МДж | 127           |
| Внутреннее сопротивление, мОм                          | 26            |
| Масса аккумуляторного элемента, т                      | 7,8           |
| Эффективность в цикле заряда / разряда                 | Не менее 0,85 |

Для определения эффективности применения НЭЭ в тяговых сетях метрополитена рассмотрим процессы заряда-разряда. Эквивалентная схема замещения для исследования процесса заряда представлена на рисунке 2.

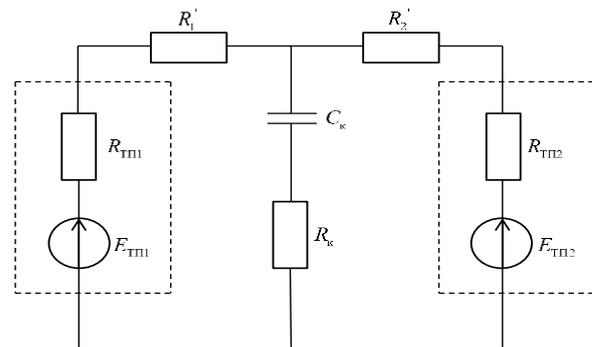


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения совместной работы СТЭ с НЭЭ в процессе заряда

На рисунке 2  $R'_1$  – сопротивление участка цепи контактной сети от ТП<sub>1</sub> до места подключения НЭЭ;  $R'_2$  – сопротивление участка контактной сети от места подключения НЭЭ до ТП<sub>2</sub>.

При исследовании процесса заряда НЭЭ (см. рисунок 2) были приняты следующие допущения:

1 Все тяговые подстанции односторонние, имеют одинаковое внутреннее сопротивление и одинаковый уровень напряжения на шинах ТП.

2 Эквивалентные ЭДС первой и второй ТП соответственно будут равны

$$E_{ТП1} = E_{ТП2} = E_{ТП}. \quad (5)$$

3 Эквивалентные внутренние сопротивления первой и второй ТП также будут равны

$$R_{ТП1} = R_{ТП2} = R_{ТП}. \quad (6)$$

4 Сопротивление участка цепи контактной сети, Ом, от ТП<sub>1</sub> до места подключения НЭЭ

$$R'_1 = xR_0, \quad (7)$$

где  $x$  – длина участка контактной сети от ТП<sub>1</sub> до места подключения НЭЭ, км.

5 Сопротивление участка контактной сети, Ом, от места подключения НЭЭ до ТП<sub>2</sub>

$$R'_2 = (L-x)R_0, \quad (8)$$

где  $L$  – длина участка контактной сети от ТП<sub>1</sub> до ТП<sub>2</sub>, км.

6 Сопротивление контактной сети, Ом, определяем

$$R_{кв} = R_{кр} + R_{кп}, \quad (9)$$

где  $R_{кр}$  – сопротивление контактного рельса;  $R_{кп}$  – сопротивление контактного провода.

Следующий этап исследования заключается в определении токов и напряжений, возникающих в процессе заряда аккумуляторной установки. После простых преобразований эквивалентной схемы замещения, изображенной на рисунке 2, получим эквивалентную схему, представленную на рисунке 3.

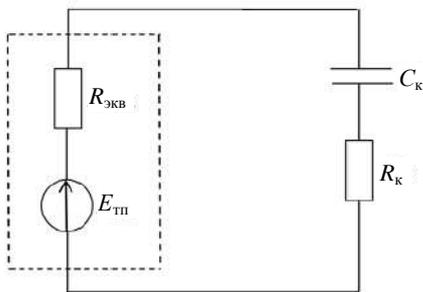


Рисунок 3 – Эквивалентная схема замещения заряда НЭЭ

Тогда напряжение заряда, В,

$$U_C = E \left( 1 - e^{-t/C(R_к + R_{экв})} \right). \quad (10)$$

Выражение для определения тока заряда примет вид

$$i_C = \frac{E}{R_к + R_{экв}} e^{-t/C(R_к + R_{экв})}. \quad (11)$$

В качестве примера расчетов по предложенной выше методике заряда НЭЭ были построены графические зависимости напряжений и токов заряда аккумуляторной установки по времени с учётом изменения их места расположения, представленные на рисунках 4, 5.

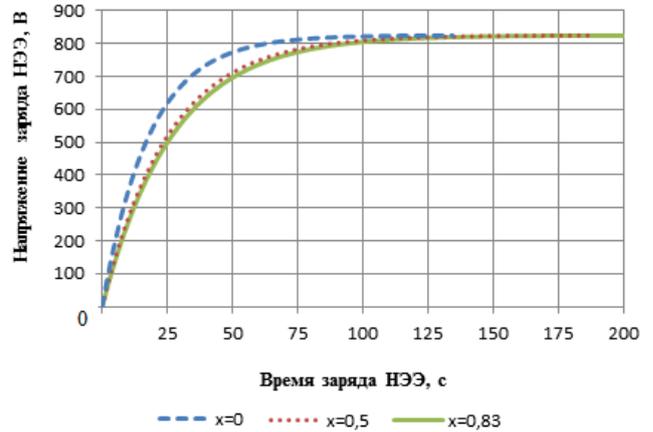


Рисунок 4 – График зависимости напряжения заряда от времени при различных местах расположения НЭЭ

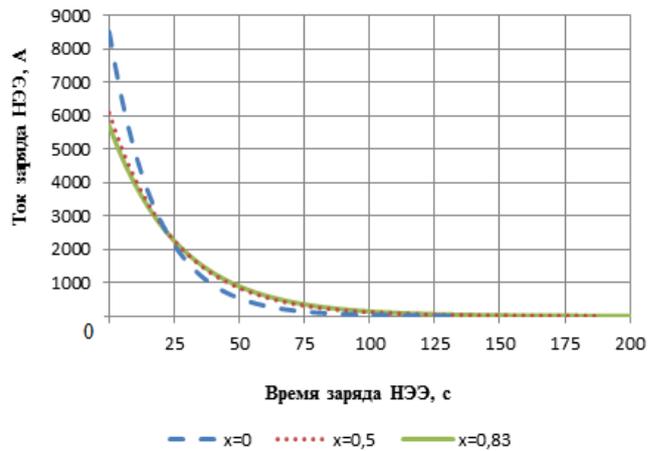


Рисунок 5 – График зависимости тока заряда от времени при различных местах расположения НЭЭ

Следующим этапом рассмотрения процесса заряда НЭЭ является тот факт, что до коммутации емкость на аккумуляторной установке была заряжена до напряжения  $U_C(0_-) = U_0$ . Тогда выражение напряжения заряда НЭЭ примет вид

$$U_C = E \left( 1 - e^{-t/C(R_к + R_{экв})} \right) + U_0 e^{-t/C(R_к + R_{экв})}. \quad (12)$$

Ток заряда НЭЭ составит

$$i_C = \frac{E - U_0}{R_к + R_{экв}} e^{-t/C(R_к + R_{экв})}. \quad (13)$$

По полученным данным были построены графические зависимости напряжений и токов заряда аккумуляторной установки по времени с учётом изменения места расположения НЭЭ (рисунки 6, 7).

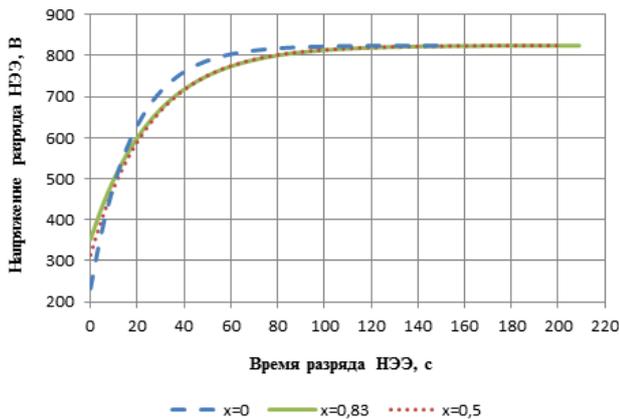


Рисунок 6 – График зависимости напряжения заряда от времени при различных местах расположения НЭЭ

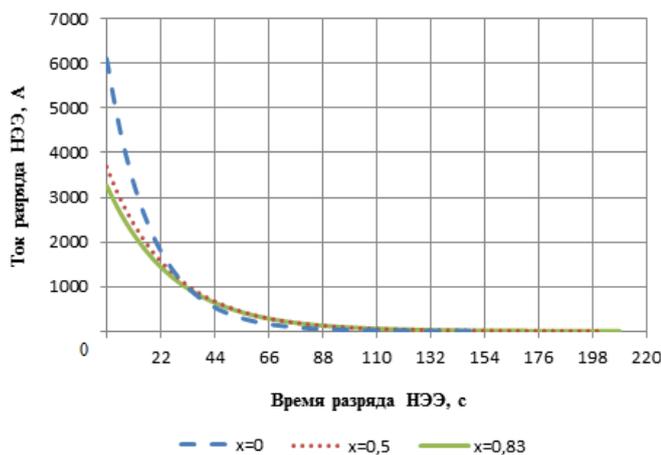


Рисунок 7 – График зависимости тока заряда от времени при различных местах расположения НЭЭ

Из представленных выше графиков (см. рисунки 4–7) можно сделать вывод о том, что процесс заряда протекает интенсивнее, если устанавливать НЭЭ непосредственно на ТП.

Следующим этапом представленной модели является рассмотрение режима разряда накопителя. Анализ процесса разряда НЭЭ в тяговых сетях метрополитена необходимо начать с рассмотрения схемы замещения, изображенной на рисунке 1.

При расчете процесса разряда НЭЭ были приняты следующие допущения:

1 Все тяговые подстанции однотипны, имеют одинаковое внутреннее сопротивление и одинаковый уровень напряжения на шинах.

2 Эквивалентная ЭДС первой ТП и второй соответственно, а также эквивалентные внутренние сопротивления ТП будут определяться по выражениям (5) и (6).

Процесс разряда НЭЭ осуществляются в период возрастания токовой нагрузки и описывается дифференциальным уравнением

$$U_C - U_R = U_C - (R_k + R_{сум})i = E. \quad (14)$$

Тогда напряжение разряда НЭЭ определяется выражением

$$U_C = Ee^{-t/C(R_k + R_{сум})}. \quad (15)$$

По полученным результатам были построены графические зависимости напряжений разряда по времени с учётом изменения места расположения НЭЭ (рисунок 8).

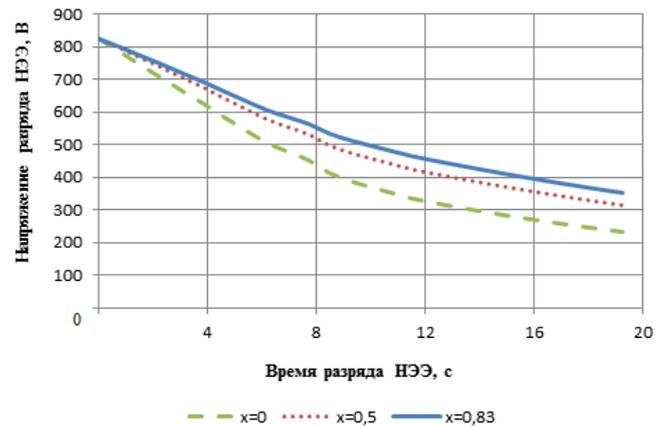


Рисунок 8 – График зависимости напряжения разряда от времени при различном месте расположения НЭЭ

Из графиков следует, что процесс заряда происходит быстрее в том случае, когда накопительная установка располагается на первой ТП, при этом НЭЭ разряжается до минимального напряжения. При удалении установки вдоль фидерной зоны ко второй ТП НЭЭ будет разряжаться медленнее, так как разгон ЭПС осуществляется непосредственно возле первой ТП.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1 Разработанная авторами методика расчета позволяет выполнять исследования процессов заряда-разряда, возникающих при совместной работе НЭЭ и электрифицированного транспорта в тяговых сетях (ТС) метрополитена.

2 При выполнении анализа рационального места подключения накопителей в ТС метрополитена было установлено, что наилучшим местом их размещения является непосредственно ТП, т.к. разгон и торможения ПС происходят в непосредственной близости к ней и процессы заряда-разряда НЭЭ протекают интенсивнее.

### Список литературы

1 Сулим, А. А. Обоснование места установки емкостных накопителей энергии в системах тягового электроснабжения метрополитена / А. А. Сулим // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2013. – Ч. 2. – № 22. – С. 282–285.

2 Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шадохин // *Известия*

Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 54–64.

3 Сулим, А. А. Обоснование места установки емкостных накопителей энергии в системах тягового электроснабжения метрополитена / А. А. Сулим // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – Вып. № 2/2013 (22). – Ч. 2. – С. 282–285.

4 Тяговые и электрические расчеты по первому участку третьей линии Минского метрополитена от станции Корже-

невского до станции Площадь Юбилейная. Проверка адекватности тяговых и электрических расчетов (заключительный) : отчет о НИР / БелГУТ; рук. В. С. Могила. – Гомель, 2014. – 74 с. – № 2009.33-2с (8280).

5 Быков, Е. И. Тяговые сети метрополитена / Е. И. Быков, Б. В. Панин, В. Н. Пупынин. – М. : Транспорт, 1987. – 256 с.

6 Емкостные накопители в системе электроснабжения метрополитена / В. Ю. Клинов [и др.] // Русский инженер. Энергосберегающие технологии. – 2008. – № 2 (17). – С. 62–64.

Получено 10.11.2017

**O. S. Ananieva, V. N. Podolskaya.** Technique for calculating transient processes un the joint operation of the traction power supply system of the subway with electrical energy storage.

A technique for calculating the transient processes that arise when the subway and electric rolling stock traction system work together with electric energy storage is developed. Possible options for connecting the storage unit in the traction networks of the subway for the selected settlement area are presented. As a result of the conducted studies, graphical dependences of voltage and charge-discharge currents on time were obtained at various locations of the accumulating unit. The charge-discharge studies of the storage unit have been carried out according to the developed methodology and conclusions have been drawn that the obtained technique can be used in the calculation of traction power supply systems.