

## СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА С СОВРЕМЕННЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ И НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

*Розглянуті п'ять систем електропостачання метрополітену, традиційна та системи електропостачання з активним випрямлячем і з накопичувачем енергії, виконана оцінка втрат енергії в схемах систем живлення метрополітену.*

*Рассмотрены пять систем электроснабжения метрополитена, традиционная и системы электроснабжения с активным выпрямителем и с накопителем энергии, выполнена оценка потерь энергии в схемах систем электроснабжения метрополитена.*

### ВВЕДЕНИЕ

Метрополитен (МП) обеспечивает значительную часть всех городских транспортных перевозок при высокой надежности движения [1]. В настоящее время в метрополитенах Украины перевозка пассажиров обеспечивается, в основном, вагонами с коллекторными двигателями постоянного тока последовательного возбуждения, питание которых осуществляется от контактной сети с номинальным напряжением 825 В. Контактная сеть питается от наземных или подземных тяговых подстанций (ТП), которые подключаются к сети 6(10) кВ через трехфазный понижающий трансформатор и диодный шестипульсный мостовой выпрямитель. Затраты электроэнергии на питание поездов в таких системах составляют до 80-95 % от общих затрат электроэнергии в МП и являются существенной составляющей себестоимости пассажирских перевозок (около 30 %) [1], [2]. Значительную часть затрат электроэнергии составляют потери на тяговых подстанциях, в контактной сети, тяговых электроприводах и их тормозных резисторах. Кроме того тяговые подстанции генерируют высшие гармоники тока в сеть 6(10) кВ, вызывая дополнительные потери энергии и искажения напряжения сети [3]. Вышеперечисленные факторы стимулируют поиск новых эффективных технических решений, которые позволяют существенно снизить потери энергии при эксплуатации метрополитена.

В работе [4] рассмотрены характеристики традиционной тяговой подстанции и перспективных подстанций, в которых используется активный выпрями-

тель (АВ) или силовой активный фильтр (САФ). Использование активных выпрямителей открывает дополнительную возможность перехода от динамического к рекуперативному торможению в поездах с тяговыми электроприводами постоянного и переменного тока и полупроводниковыми преобразователями, при котором кинетическая энергия движущегося поезда частично возвращается в питающую сеть, что позволяет сократить потребление электроэнергии более чем в 2 раза. Дополнительное снижение потерь электроэнергии может быть достигнуто за счет использования накопителей энергии (НЭ), устанавливаемых на поезде или на тяговой подстанции.

В настоящей работе рассмотрены и сопоставлены по потерям энергии пять вариантов систем электроснабжения (СЭ) МП: традиционная, СЭ с АВ и рекуперацией энергии в сеть, СЭ с АВ и с стационарным или с бортовым НЭ, бесконтактная СЭ с бортовым НЭ. При определении относительных потерь энергии в качестве базисной величины была принята кинетическая энергия поезда МП.

### ТРАДИЦИОННАЯ ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ

Традиционная ТП состоит из двух или более трехфазных трансформаторов, которые подключаются к шестипульсному мостовому диодному выпрямителю. В работе одновременно находятся два блока "трансформатор-выпрямитель". Для обеспечения надежности каждый участок контактной сети питается от двух параллельно включенных ТП. На рис. 1 представлена эквивалентная схема традиционной СЭ МП.

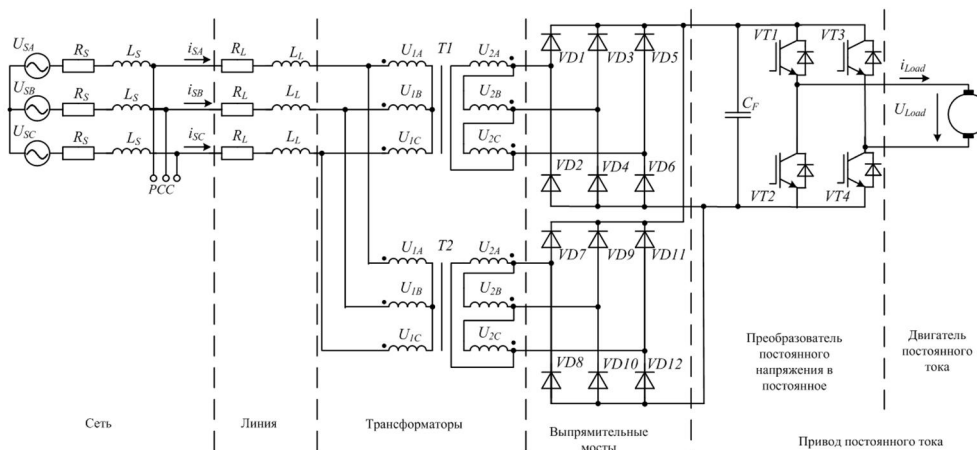


Рис. 1. Эквивалентная схема традиционной СЭ МП

Сеть 6(10) kV представлена трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений  $u_{SA}$ ,  $u_{SB}$ ,  $u_{SC}$ . Параметры сети учтены активным сопротивлением  $R_S$  и индуктивностью  $L_S$ . Параметры линии, которая соединяет тяговую подстанцию 6(10)/0.67 kV с подстанцией более высокого напряжения, учтены активным сопротивлением  $R_L$  и индуктивностью  $L_L$ . Сетевые обмотки трансформаторов  $T1$ ,  $T2$  подключаются к сети 6 (10) kV, а вентиляльные – к шестипульсному мостовым диодным выпрямителям  $VD1 - VD6$  ( $VD7 - VD12$ ). Нагрузка представлена эквивалентным приводом постоянного тока, который состоит из преобразователя постоянного напряжения в постоянное (ППН) ( $VT1 - VT4$ ) и двигателя постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением.

В современных приводах постоянного тока, которые применяются в МП, реализуется динамическое торможение, при котором кинетическая энергия движущегося поезда передается в тормозные резисторы и рассеивается в виде тепла. Время движения подвижного состава между двумя станциями в среднем составляет 180 с. При этом время разгона до номинальной скорости  $t_{ac}$  в среднем составляет 23,1 с, а время торможения  $t_{br}$  – 27,8 с. Время стоянки поезда на станции  $t_{st}$  – 30 с [1]. При условии, что после разгона поезд движется с номинальной скоростью на протяжении времени  $t_{mov}$ , равном 129,1 с, графики мощности, тока и напряжения нагрузки будут иметь вид, представленный на рис. 2. При традиционной СЭ МП график мощности сети, от формы которого зависит величина энергии потерь, показан на рис. 3.

При разгоне двигателя постоянного тока развивают номинальный момент на валу, мощность сети постепенно нарастает и в момент достижения поездом номинальной скорости становится равной номинальной мощности нагрузки плюс мощность потерь во всех элементах СЭ МП,  $P_{S,nom}$ . При движении поезда с постоянной скоростью, после разгона, двигатели постоянного тока развивают момент на валу равный статическому моменту, который, в качестве примера, принят равным 10 % от номинального момента, мощность сети соответственно становится равной 10 % от номинальной мощности нагрузки плюс потери во всех элементах СЭ МП,  $0,1P_{S,nom}$ .

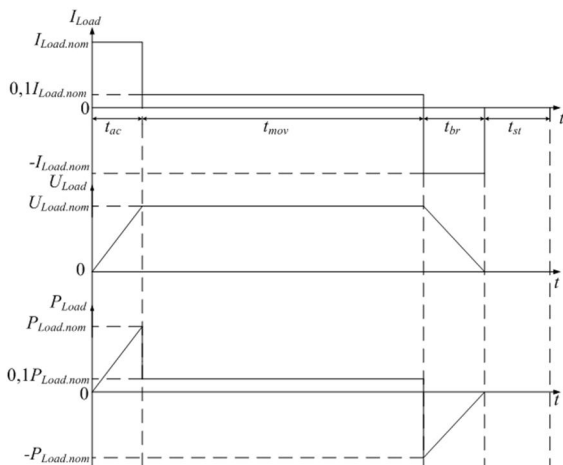


Рис. 2. Графики мощности, тока и напряжения нагрузки в интервале движения подвижного состава между станциями

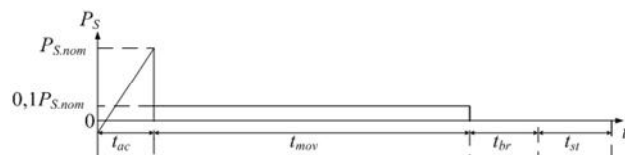


Рис. 3. График мощности сети в интервале движения подвижного состава между станциями

Величины потерь энергии в элементах СЭ МП, приведенные в табл. 1, рассчитаны с учетом выше приведенных условий. Статический момент может, например, составлять 20-30 % от номинального момента ДПТ поезда МП. В этом случае, мощность сети, при движении поезда с постоянной скоростью, будет соответственно равной  $0,2P_{S,nom}$  или  $0,3P_{S,nom}$ , что приведет к увеличению потерь энергии в элементах СЭ МП в 1,3 – 1,8 раза от величин потерь энергии, приведенных в табл. 1.

На рис. 4 приведена *MatLab*-модель традиционной СЭ МП с эквивалентным приводом постоянного тока.

Модель состоит из тринадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- силовая схема – блоки 1, 3, 4 – 8, 10, 11;
- система управления – блок 9;
- датчики тока и напряжения – блок 2;
- многолучевые осциллографы – блоки 12, 13.

Назначение блоков силовой схемы: 1 – промышленная сеть; 3 – кабели, соединяющие тяговую подстанцию с подстанцией более высокого напряжения; 4, 5 – понижающие трансформаторы; 6, 7 – шестипульсные мостовые неуправляемые выпрямители; 8 – фильтрующий конденсатор на входе ППН; 10 – однофазный мостовой ППН; 11 – эквивалентный двигатель постоянного тока.

На рис. 5 представлены кривые токов и напряжений сети в установившемся режиме, тока и напряжения нагрузки в интервале движения поезда. Номинальная мощность нагрузки 2,64 MW.

Величины потерь энергии на участках СЭ и в подвижном составе МП, приведенные в табл. 1, представлены в процентах от максимальной кинетической энергии движущегося поезда:

$$E_{Loss}^* = \frac{E_{Loss}}{E_k} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Кинетическая энергия поезда зависит от массы подвижного состава (примерно  $225 \cdot 10^3$  kg) и номинальной скорости его движения (25 m/s)

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{225 \cdot 10^3 \cdot 25^2}{2} = 70,3 \text{ MJ}. \quad (2)$$

Кроме кинетической энергии движущийся поезд обладает энергией вращающихся масс и потенциальной энергией. Энергией вращающихся масс (колесных пар) можно пренебречь, так как она составляет около 0,2 % от кинетической энергии:

$$E_r = \frac{j\omega^2}{2} = \frac{mv^2}{8\pi^2} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 25^2}{8\pi^2} = 0,16 \text{ MJ}, \quad (3)$$

где  $j$  – момент инерции,  $\omega$  – угловая скорость,  $m$  – масса колесных пар,  $v$  – линейная скорость движения поезда.

Энергия потерь в СЭ МП в процентах от максимальной кинетической энергии поезда МП

Тип СЭ	Традиционная	СЭ с АВ и рекуперацией энергии в сеть	СЭ с АВ и стационарным НЭ	СЭ с АВ и бортовым НЭ	Бесконтактная СЭ с бортовым НЭ
Линия 6 kV	0,342	0,591	0,104	0,104	0,276
Трансформатор	0,484	0,551	0,097	0,097	0,152
Линия Тр. – Вып. и входные реакторы	0,078	1,269	0,223	0,223	0,197
Выпрямитель	0,113	1,084	0,554	0,554	0,528
Контактный рельс	1,498	3,61	3,61	0,584	0
ППН	1,318	1,318	1,318	1,318	1,318
ДПТ	3,746	3,746	3,746	3,746	3,746
НЭ	0	0	1,479	1,584	1,066
Тормозные резисторы	96,936	0	0	0	0
Всего	104,515	12,17	11,131	8,21	7,283

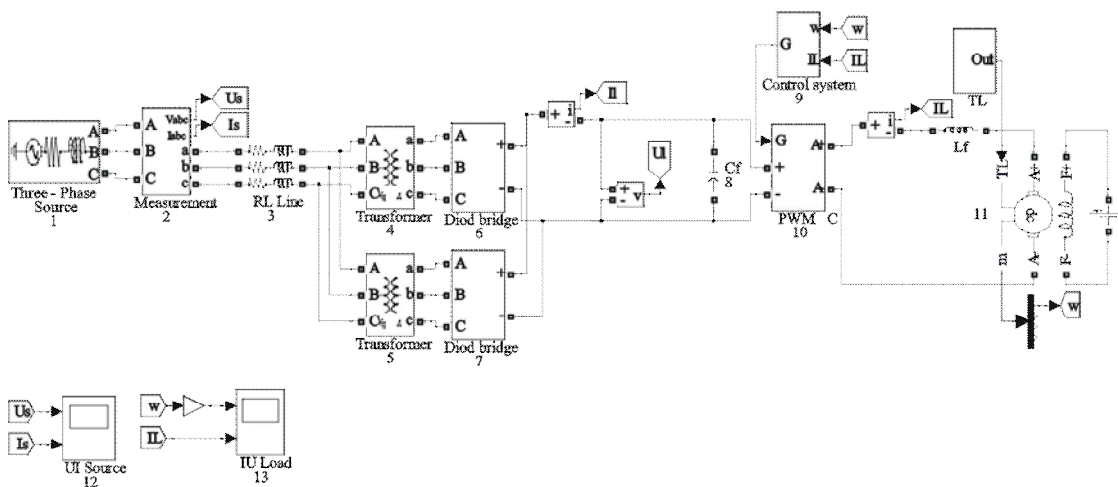


Рис. 4. MatLab-модель традиционной системы электроснабжения МП с приводом постоянного тока

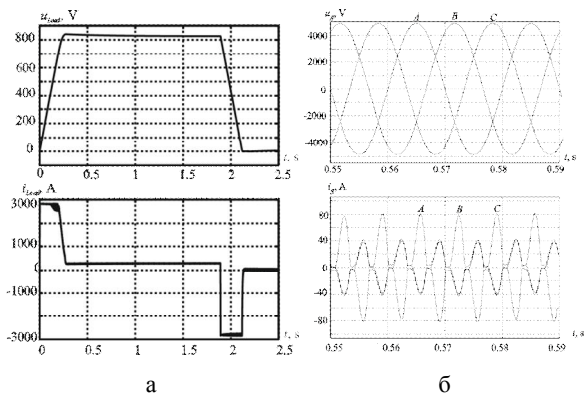


Рис. 5. Осциллограммы напряжения и тока сети и нагрузки

Потенциальная энергия поезда зависит от характера пути (спусков и подъемов), и может быть разной по величине, например, при подъеме или спуске на 30 м потенциальная энергия сопоставима с кинетической:

$$E_p = mgh = 225 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 30 = 66,2 \text{ MJ}, \quad (4)$$

где  $m$  – масса поезда,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – высота подъема.

В первом приближении при оценке потерь энергии был принят равномерный характер пути, также не учитывалось сопротивление воздуха в туннеле. Потери энергии на участке СЭ МП определялись из выражения:

$$E_{Loss} = RI^2 \Delta t, \quad (5)$$

где  $R$  – активное сопротивление в элементах СЭ МП (линия, обмотки трансформатора, полупроводниковые ключи выпрямителя, накопитель энергии, контактный рельс, полупроводниковые ключи ППН, двигатель постоянного тока, тормозные резисторы),  $I$  – действующее значение тока через элементы СЭ МП,  $\Delta t$  – интервал времени, в течение которого протекает ток  $I$ .

При расчетах учитывались графики мощности сети и нагрузки и, следовательно, графики тока сети и нагрузки. Для традиционной СЭ МП форма тока сети совпадает с формой графика мощности сети, представленного на рис. 3. Например, потери энергии в линии 6 kV при традиционной СЭ:

$$E_{Loss} = \frac{3}{\cos^2 \varphi} R_L I_S^2 \Delta t, \quad (6)$$

где  $\cos \varphi$  – косинус угла сдвига сетевого тока относительно напряжения сети,  $I_S$  – действующее значение тока сети,  $R_L$  – активное сопротивление линии 6 kV.

$$R_L = \rho_{AL} \frac{l}{S}, \quad (7)$$

где  $\rho_{AL}$  – удельное сопротивление алюминия,  $l$  – длина линии,  $S$  – площадь поперечного сечения кабеля 6 kV.

С учетом графика мощности сети (рис. 3):

$$E_{Loss} = \frac{1}{\cos^2 \varphi_1} R_L I_{S1}^2 \Delta t_{ac} + \frac{3}{\cos^2 \varphi_2} R_L I_{S2}^2 \Delta t_{mov}, \quad (8)$$

$$E_{Loss} = \cos^{-2} 24^\circ \cdot 0,15 \cdot 225^2 \cdot 23 +$$

$$+ 3 \cdot \cos^{-2} 8^\circ \cdot 0,15 \cdot 22,5^2 \cdot 129 = 332910 \text{ J},$$

$$E_{Loss*} = 0,47 \text{ \%}.$$

Приведенные в табл. 1, результаты дают представление о величине потерь энергии в традиционной СЭ МП.

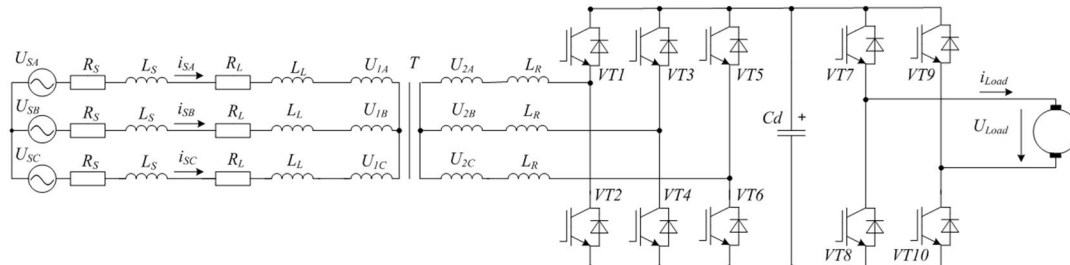


Рис. 6. СЭ МП с АВ и эквивалентным приводом постоянного тока

Сеть 6(10) kV представлена трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений  $u_{SA}$ ,  $u_{SB}$ ,  $u_{SC}$ . Параметры сети учтены активным сопротивлением  $R_S$  и индуктивностью  $L_S$ . Параметры линии, которая соединяет тяговую подстанцию 6(10)/0.41 kV с подстанцией более высокого напряжения, учтены активным сопротивлением  $R_L$  и индуктивностью  $L_L$ . В отличие от традиционной СЭ, где напряжение на вентильных обмотках трансформаторов  $T1$  ( $T2$ ) составляет 0.67 kV, в СЭ с АВ необходимо обеспечить следующее соотношение между напряжением на конденсаторе  $C_d$  и максимальным линейным напряжением на входе АВ [5]:

$$U_C = (1,3 \dots 1,5) U_{л \max}. \quad (9)$$

Сетевая обмотка трансформатора  $T$  подключается к сети 6(10) kV, а вентильная через реакторы  $L_R$  к активному выпрямителю, выполненному на IGBT-транзисторах  $VT1 - VT6$ , с выходным конденсатором  $C_d$ . Нагрузка представлена эквивалентным приводом постоянного напряжения в постоянное ( $VT7 - VT10$ ) и двигателя постоянного тока.

Графики мощности, тока и напряжения нагрузки представлены на рис. 2, график мощности сети – на рис. 7.

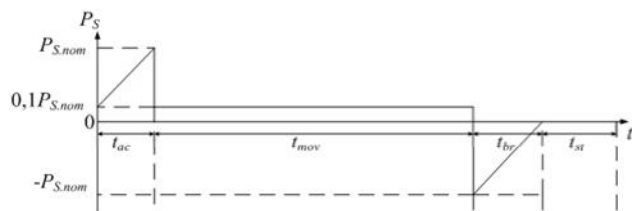


Рис. 7. График мощности сети в интервале движения подвижного состава между станциями

На рис. 8 приведена соответственно *MatLab*-модель СЭ МП с АВ и приводом постоянного тока.

Модель состоит из четырнадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- силовая схема – блоки 1, 2, 4 – 6, 8, 9, 11, 12;

## СЭ МП С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ И РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЬ

Применение АВ в СЭ МП обеспечивает улучшение электромагнитной совместимости СЭ с питающей сетью 6(10) kV [4], а также открывает дополнительную возможность перехода к рекуперативному торможению, при котором кинетическая энергия движущегося поезда возвращается в питающую сеть.

На рис. 6 представлена эквивалентная схема СЭ МП с АВ и приводом постоянного тока.

- система управления – блоки 7, 10;
- датчики тока и напряжения – блок 3;
- многолучевые осциллографы – блоки 13, 14.

Назначение блоков силовой схемы: 1 – промышленная сеть; 2 – активное сопротивление и индуктивность питающей сети; 4 – кабели, соединяющие тяговую подстанцию с подстанцией более высокого напряжения; 5 – понижающий трансформатор; 6 – входные реакторы АВ; 8 – АВ; 9 – выходной конденсатор АВ; 11 – однофазный мостовой ППН; 12 – эквивалентный двигатель постоянного тока.

В *MatLab*-модели (рис. 8) используется гистерезисная система управления. Переключение силовых ключей АВ происходит с изменяющейся частотой [5].

На рис. 9 представлены кривые токов и напряжений сети в установившемся режиме.

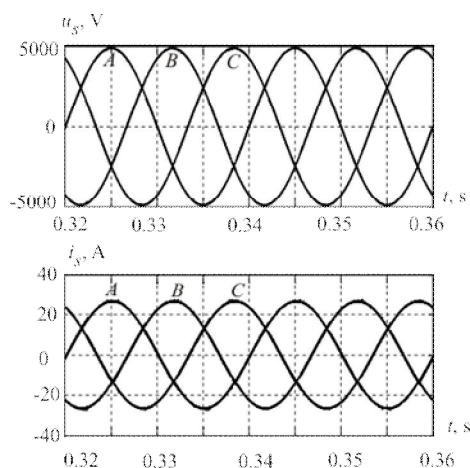


Рис. 9. Осциллограммы фазных токов и напряжений сети в установившемся режиме в СЭ с АВ

Кривые тока и напряжения нагрузки СЭ МП с АВ, аналогичные кривым тока и напряжения нагрузки традиционной СЭ МП, приведены на рис. 5,а. Номинальная мощность нагрузки 2,64 MW.

В табл. 1 приведены величины потерь энергии на участках СЭ МП с АВ и рекуперацией энергии в сеть.

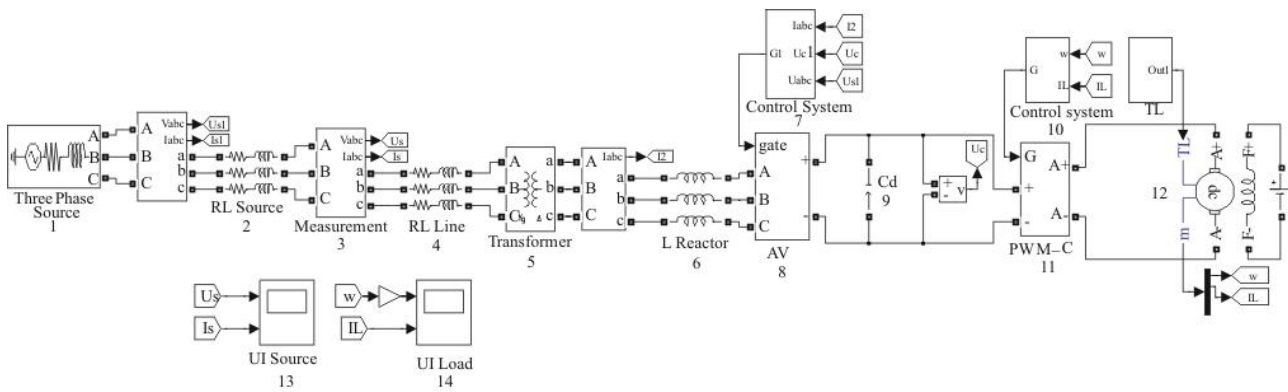


Рис. 8. MatLab-модель системы электроснабжения МП с АВ и приводом постоянного тока

При сравнении величин потерь энергии на отдельных элементах традиционной СЭ МП и СЭ с АВ, можно сделать вывод, что потери в элементах СЭ с АВ и рекуперацией энергии в сеть существенно увеличиваются по сравнению с потерями в традиционной СЭ, однако применение АВ обеспечивает электромагнитную совместимость СЭ МП с питающей сетью и передачу энергии, выделяемой при торможении поезда в сеть. За счет рекуперации энергии существенно снижается энергия, потребляемая из сети [6] и почти в четыре раза уменьшаются суммарные потери энергии.

#### СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МП С АВ И СТАЦИОНАРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Недостатком СЭ с рекуперацией кинетической энергии в сеть является удвоение потерь в элементах схемы, вызванное передачей энергии через все элементы СЭ в обоих направлениях: от сети к нагрузке при разгоне и от нагрузки в сеть при торможении. Устранить этот недостаток возможно путем применения стационарного, устанавливаемого на тяговой подстанции, или бортового, устанавливаемого на подвижном составе, накопителя энергии.

С учетом величины накапливаемой энергии, величины тока заряда-разряда НЭ, и интервала времени, за который должен происходить цикл заряда-разряда, на сегодняшний день перспективным в роли НЭ для МП являются суперконденсаторы, например, выпускаемые фирмой Maxwell или фирмой Элтон [7-10].

Современные аккумуляторные батареи, выпускаемые ведущими фирмами, пока не могут быть использованы в качестве НЭ для СЭ МП, потому что, несмотря на высокие достижения в повышении их КПД, они характеризуются сравнительно малым числом допустимых циклов заряда-разряда [11, 12].

В роли стационарного НЭ может быть использован выходной конденсатор АВ. В этом случае на конденсаторный модуль будут накладываться ограничения, связанные со спецификой работы СЭ МП, АВ и ППН.

Энергия, накопленная в конденсаторном НЭ:

$$E_C = \frac{C_d U_C^2}{2}, \quad (10)$$

где  $C_d$  – емкость НЭ.

Учитывая ограничение, накладываемое на выходное напряжение АВ (9), необходимая емкость НЭ может быть определена из выражения:

$$C_d = \frac{E_k}{0,28 U_{л\max}^2}, \quad (11)$$

Максимальное линейное напряжение на входе АВ зависит от условия (9) и номинального напряжения нагрузки:

$$U_{л\max} = \frac{U_{Load.nom}}{1,3}. \quad (12)$$

Силовая схема и MatLab-модель СЭ МП со стационарным накопителем энергии представлены на рис. 6 и рис. 8 соответственно. Отличие ее от СЭ МП с АВ и рекуперацией энергии в сеть заключается в алгоритме системы управления АВ и величине емкости выходного конденсаторного модуля АВ. MatLab-модель системы управления АВ для СЭ МП с стационарным НЭ представлена на рис. 10.

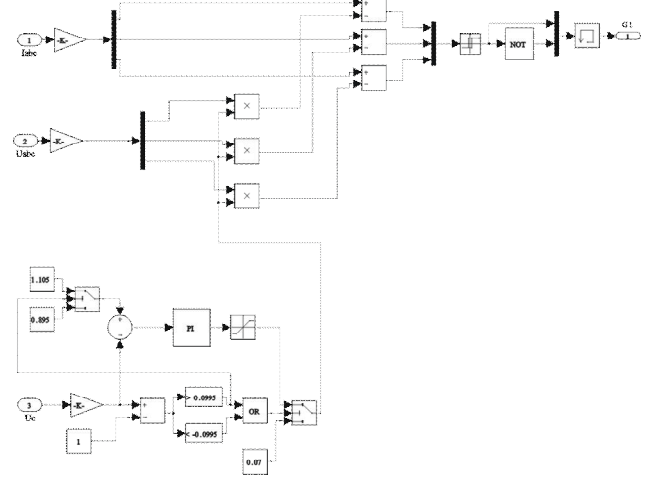


Рис. 10. Система управления АВ с выходным конденсатором НЭ

Система управления (СУ) АВ с выходным конденсаторным НЭ, выполненная на основе гистерезисного алгоритма работы, реализует следующие функции:

- формирование синусоидального сетевого тока в фазе с напряжением сети, при почти постоянной амплитуде сетевого тока в интервале движения поезда между станциями, ее величина зависит от величины потерь энергии в элементах СЭ МП, в том числе, в НЭ;
- поддержание постоянного напряжения на конденсаторном НЭ в пределах, которые ограничены условием стабильной работы АВ;

- обеспечение рекуперации энергии в сеть или потребления из сети дополнительной энергии в случае, когда напряжение на конденсаторном НЭ выходит за установленные пределы.

На рис. 11 приведены осциллограммы напряжения на конденсаторном НЭ, тока и напряжения нагрузки.

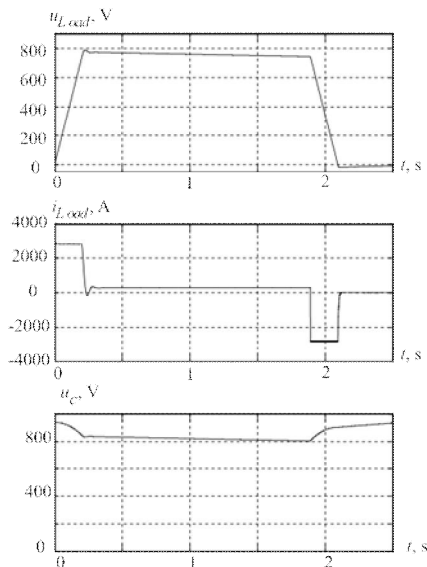


Рис. 11. Осциллограммы тока и напряжения нагрузки и напряжения НЭ

В табл. 1 приведены величины потерь энергии в элементах СЭ МП со стационарным НЭ. При сравнении величин потерь энергии в СЭ с стационарным НЭ и в традиционной СЭ или в СЭ с АВ и рекуперацией энергии в сеть можно сделать вывод – применение НЭ обеспечивает постоянство мощности сети, односторонний поток энергии, от сети в нагрузку, и, как следствие, уменьшение потерь в элементах СЭ.

#### СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МП С АВ И БОРТОВЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Схема СЭ МП с бортовым НЭ представлена на рис. 12. Сеть 6(10) kV представлена трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений  $u_{SA}, u_{SB}, u_{SC}$ . Параметры сети учтены активным сопротивлением  $R_S$  и индуктивностью  $L_S$ . Параметры линии, которая соединяет тяговую подстанцию 6(10)/0.41 kV с подстанцией более высокого напряжения, учтены активным сопротивлением  $R_L$  и индуктивностью  $L_L$ .

Сетевая обмотка трансформатора  $T$  подключается к сети 6(10) kV, а вентильная через реакторы  $L_R$  к активному выпрямителю, выполненному на IGBT-транзисторах  $VT1 - VT6$ , с выходным конденсатором  $C_d$ . Конденсаторный бортовой НЭ  $C_s$  подключается к

СЭ через широтно-импульсный преобразователь ( $VT7 - VT8, L_{cs}$ ).

Нагрузка представлена эквивалентным приводом постоянного тока, который состоит из преобразователя постоянного напряжения в постоянное ( $VT9 - VT12$ ) и двигателя постоянного тока. Емкость НЭ определяется из условий, что напряжение на конденсаторном НЭ должно быть меньше напряжения на выходном конденсаторе АВ для нормальной работы ШИП, и изменение напряжения на НЭ ограничено пределами от максимального значения до половины от этого максимального напряжения, с учетом выражения для определения энергии, накопленной конденсатором (10):

$$C_s = \frac{8E_k}{3U_{cs}^2} \quad (13)$$

$$U_{cs} < U_C$$

Кинетическая энергия  $E_k$  определяется по выражению (2), с учетом массы вагона поезда, равной  $33 \cdot 10^3$  kg.

На рис. 13 приведена *MatLab*-модель СЭ МП с бортовым НЭ. Модель состоит из девятнадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- силовая схема – блоки 1, 2, 4 – 6, 8, 9, 11 – 13, 15, 16;
- система управления – блоки 7, 10, 14;
- датчики тока и напряжения – блок 3;
- многолучевые осциллографы – блоки 17 – 19.

Назначение блоков силовой схемы: 1 – промышленная сеть; 4 – кабели, соединяющие тяговую подстанцию с подстанцией более высокого напряжения; 5 – понижающий трансформатор; 6 – входные реакторы АВ; 8 – АВ; 9 – выходной конденсатор АВ; 11 – ШИП; 12 – выходной ректор ШИП; 13 – конденсаторный НЭ; 15 – однофазный мостовой ППН; 16 – эквивалентный двигатель постоянного тока.

*MatLab*-модель системы управления АВ для СЭ МП с бортовым НЭ представлена на рис. 14.

Система управления АВ выполнена на основе гистерезисного алгоритма, реализует следующие функции:

- формирование синусоидального сетевого тока в фазе с напряжением сети, при почти постоянной амплитуде сетевого тока в интервале движения поезда между станциями, ее величина зависит от величины потерь энергии в элементах СЭ МП, в том числе, в НЭ;
- поддержание постоянного напряжения на выходном конденсаторе;
- обеспечение рекуперации энергии в сеть или потребления из сети дополнительной энергии в случае, когда напряжение на конденсаторном НЭ выходит за установленные пределы.

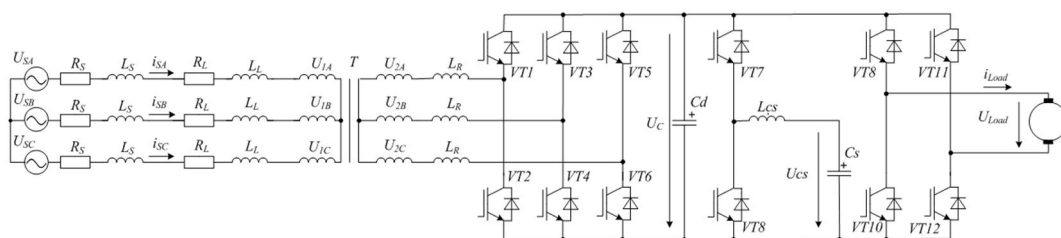


Рис. 12. Схема СЭ МП с бортовым НЭ



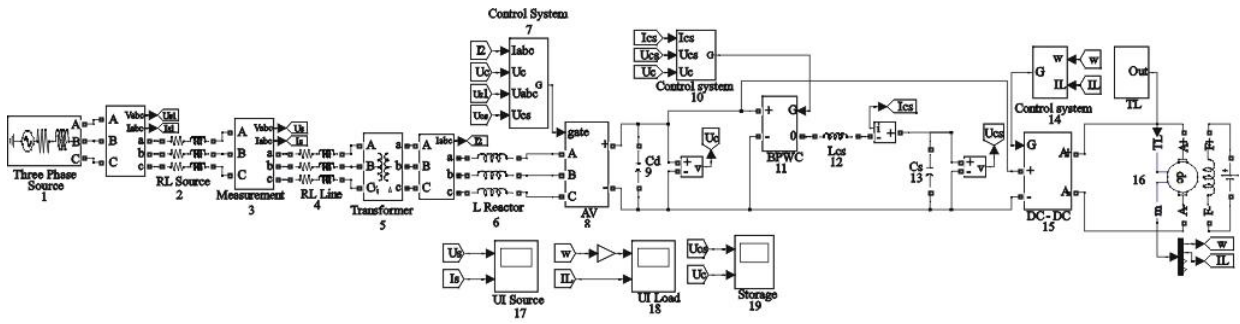


Рис. 13. *MatLab*-модель системы электроснабжения МП с бортовым НЭ

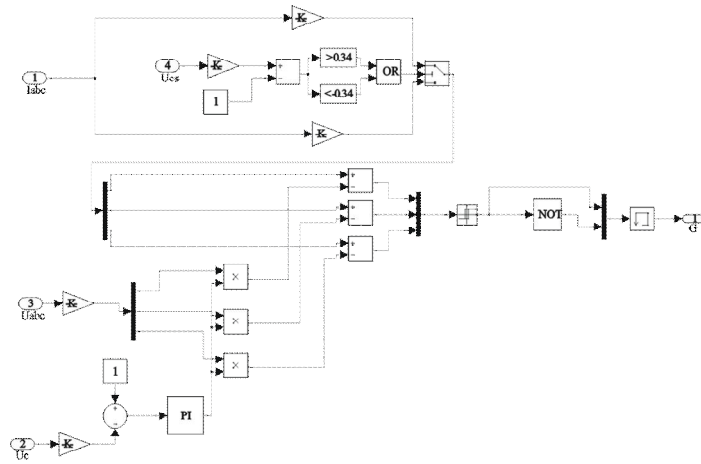


Рис. 14. Система управления АВ для СЭ МП с бортовым НЭ

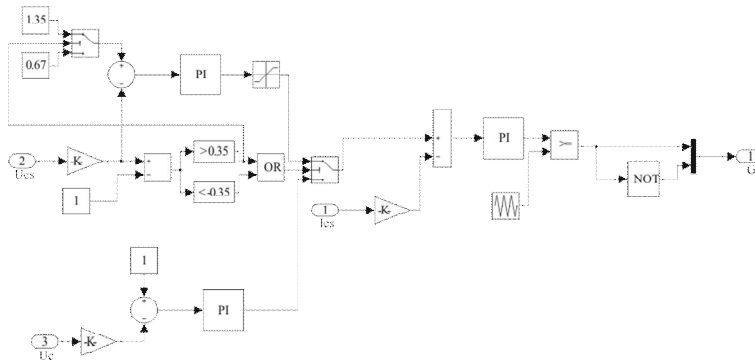


Рис. 15. Система управления ШИП с выходным конденсаторным НЭ

*MatLab*-модель системы управления ШИП с конденсаторным НЭ на выходе представлена на рис. 15.

Система управления ШИП с выходным конденсатором НЭ выполнена на основе алгоритма, который реализует следующие функции:

- формирование тока конденсаторного НЭ в соответствии с током нагрузки;
- поддержание постоянного напряжения на конденсаторном НЭ в пределах, которые ограничены условием стабильной работы накопителя и ШИП.

На рис. 16 представлены кривые тока и напряжения нагрузки СЭ МП с бортовым накопителем энергии и кривая напряжения на НЭ. Номинальная мощность нагрузки 2,64 MW. В табл. 1 приведены величины потерь энергии на участках СЭ МП с бортовым НЭ. СЭ МП с бортовым НЭ в отличие от СЭ МП с стационарным НЭ позволяет уменьшить потери энергии в контактной сети.

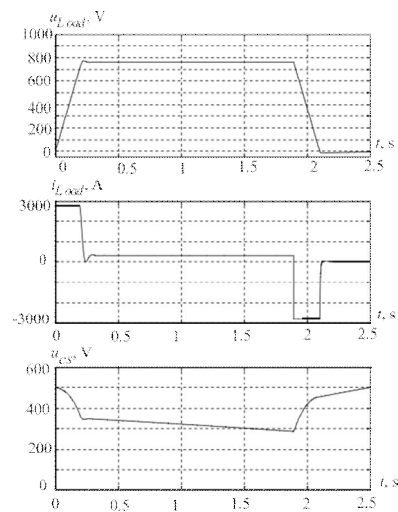


Рис. 16. Осциллограммы тока и напряжения нагрузки и напряжения НЭ

## БЕСКОНТАКТНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МП С БОРТОВЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

В работе [13] предложена бесконтактная СЭ МП с бортовым конденсаторным НЭ. При такой СЭ движение поезда между станциями осуществляется за счет энергии бортового конденсаторного НЭ, а во время стоянки на станции происходит подключение НЭ к сети и его дозаряд, необходимый для компенсации расхода энергии на преодоление сопротивления качения, сопротивления воздуха и на компенсацию потерь в элементах СЭ поезда. В случае избытка энергии при рекуперативном торможении, на подвижном составе предусматриваются тормозные резисторы. Схема бесконтактной СЭ МП с бортовым НЭ приведена на рис. 17.

На рис. 17  $C_d$  – емкость конденсатора, подключаемого к шине постоянного напряжения. Конденсаторный бортовой НЭ  $C_s$  подключается к СЭ через ШИП ( $VT1 - VT2$ ,  $L_{cs}$ ). Нагрузка представлена эквивалентным приводом постоянного тока, который состоит из преобразователя постоянного напряжения в постоянное ( $VT3 - VT6$ ) и двигателя постоянного тока.

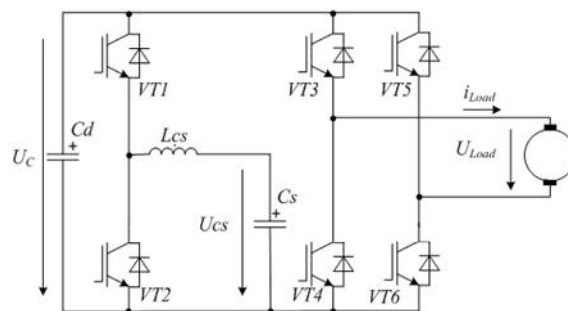


Рис. 17. Схема бесконтактной СЭ МП с бортовым НЭ

Необходимо также отметить, что график мощности сети будет иметь вид импульсов одинаковой длительности, равной времени стоянки поезда на станции (20-30 с) и различной амплитуды.

Емкость НЭ определяется условиями нормальной работы ШИП и конденсаторного НЭ из выражения (13).

На рис. 18 приведена *MatLab*-модель бесконтактной СЭ МП с бортовым НЭ.

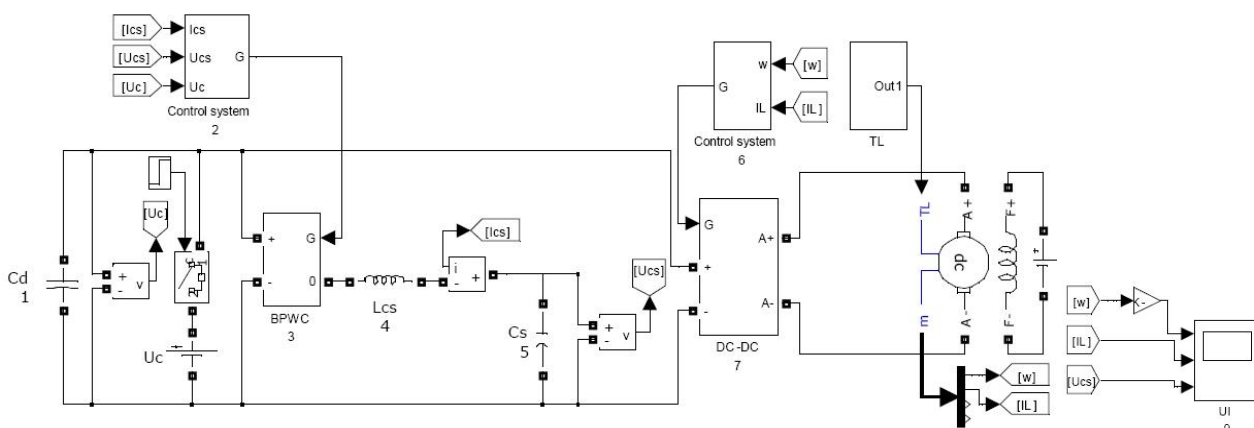


Рис. 18. *MatLab*-модель бесконтактной системы электроснабжения МП с бортовым НЭ

Модель состоит из девяти блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- силовая схема – блоки 1, 3 – 5, 7, 8;
- система управления – блоки 2, 6;
- датчики тока и напряжения;
- многолучевые осциллографы – блок 9.

Назначение блоков силовой схемы: 1 – конденсатор, подключающийся к шине постоянного напряжения; 3 – ШИП; 4 – выходной ректор ШИП; 5 – конденсаторный НЭ; 7 – однофазный мостовой ППН; 8 – эквивалентный двигатель постоянного тока.

*MatLab*-модель системы управления ШИП с конденсаторным НЭ на выходе в бесконтактной СЭ МП аналогична соответствующей *MatLab*-модели в СЭ МП с бортовым НЭ и выполняет такие же функции (рис. 15). В табл. 1 приведены величины потерь энергии на участках бесконтактной СЭ МП с бортовым НЭ.

В бесконтактной СЭ МП отсутствуют потери энергии в контактном рельсе, однако необходима большая установленная мощность СЭ, чем в СЭ с бортовым НЭ, так как дозаряд НЭ на станции происходит за интервал

времени в шесть раз меньший и примерно в четыре раза большим током, чем в СЭ МП с бортовым НЭ.

Приведенные в табл. 1, результаты дают представление об величине потерь энергии и эффекте применения рекуперативного торможения и НЭ в СЭ МП, рассматриваемых в данной работе. При разработке конкретной СЭ необходимы более точные расчеты с учетом всех составляющих потерь энергии и уточнением графика мощности.

### ВЫВОДЫ

1. Переход от динамического или резистивного торможения к рекуперативному в поезде МП позволяет уменьшить в 2 и более раза энергию, потребляемую из сети на тягу поезда, и в четыре раза сократить потери энергии в элементах СЭ.

2. Применение стационарного или бортового НЭ позволяет обеспечить постоянство графика мощности сети и уменьшить потери энергии в элементах СЭ МП.

3. СЭ МП с бортовым НЭ обладает существенно меньшими потерями энергии в контактном проводе, чем СЭ с стационарным НЭ.



4. В бесконтактной СЭ МП отсутствуют потери энергии в контактном рельсе, однако увеличивается масса поезда и необходима большая установленная мощность СЭ, чем в СЭ с бортовым НЭ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.metro.kharkov.ua.
2. Хворост М.В. "Розвиток наукових основ систем електричної тяги метрополітенів" – автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.
3. Жемеров Г.Г., Ковальчук О.И. Характеристики мощного шестипульсного мостового неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2011. – №1. – С. 19-24.
4. Жемеров Г.Г., Холод О.И. Пути модернизации систем электроснабжения метрополитена // *Технічна електродинаміка.* Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – Част. 1. – 2012. – С. 27-35.
5. Жемеров Г.Г., Ковальчук О.И. Автономный выпрямитель – источник напряжения с гистерезисной системой управления // *Технічна електродинаміка: Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність".* – Част. 2. – 2011. – С. 75-83.
6. М.П. Бычкова. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро // *Электронный журнал "ЭНЕРГОСОВЕТ".* – 2011. – № 3 (16).
7. Barrero, R.; Tackoen, X.; Van Mierlo, J. Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network // *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE.* – P. 1-8.
8. Pavel, D.; Lubos, S. The energy storage system with supercapacitor for public transport // *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE.* – P. 1826-1830.
9. <http://www.maxwell.com>.
10. <http://www.elton-cap.ru>.
11. Корев Д. Обзор аккумуляторных накопителей // *Интеллектуальные сети России и Мира. Электронный ресурс www.smartgrid.su.*
12. Vazquez, S.; Lukic, S.M.; Galvan, E.; Franquelo, L.G.; Carrasco, J.M. Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications // *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010.* – Vol. 57. – No.12. – P. 3881-3895.
13. Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway. Allègre, A.-L.; Bouscayrol, A.; Delarue, P.; Barrade, P.; Chattot, E.; El-Fassi, S. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 57, Issue 12.* – 2010, Page(s): 4001-4012.

**Bibliography (transliterated):** 1. www.metro.kharkov.ua. 2. Hvorost M.V. "Rozvitok naukovih osnov sistem elektrichnoї tyagi metropoliteniv" - avtoreferat disertacii na zdobuttia naukovoogo stupenya doktora tehnicnih nauk. 3. Zhemerov G.G., Koval'chuk O.I.

Harakteristiki moschnogo shestipul'snogo mostovogo neupravlyaemogo vypryamitelya s emkostnym fil'trom // *Elektrotehnika i elektromehanika.* - 2011. - №1. - S. 19-24. 4. Zhemerov G.G., Holod O.I. Puti modernizacii sistem `elektrosnabzheniya metropolitena // *Tehnichna elektrodinamika.* Temat. vip. "Silova elektronika ta energoefektivnist". - Chast. 1. - 2012. - S. 27-35. 5. Zhemerov G.G., Koval'chuk O.I. Avtonomnyj vypryamitel' - istochnik napryazheniya s gisterezisnoj sistemoy upravleniya // *Tehnichna elektrodinamika: Tematichnij vipusk "Silova elektronika ta energoefektivnist".* - Chast. 2. - 2011. - S. 75-83. 6. M.P. Bychkova. Sistema nakopitelej `elektro`energii dlya povysheniya `energo`effektivnosti v metro // *Elektronnyj zhurnal "ENERGOSOVET".* - 2011. - № 3 (16). 7. Barrero, R.; Tackoen, X.; Van Mierlo, J. Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network // *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE.* - P. 1-8. 8. Pavel, D.; Lubos, S. The energy storage system with supercapacitor for public transport // *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE.* - P. 1826-1830. 9. <http://www.maxwell.com>. 10. <http://www.elton-cap.ru>. 11. Korev D. Obzor akkumulyatornyh nakopitelej // *Intellektual'nye seti Rossii i Mira. Elektronnyj resurs www.smartgrid.su.* 12. Vazquez, S.; Lukic, S.M.; Galvan, E.; Franquelo, L.G.; Carrasco, J.M. Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications // *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010.* - Vol. 57. - No.12. - P. 3881-3895. 13. Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway. Allègre, A.-L.; Bouscayrol, A.; Delarue, P.; Barrade, P.; Chattot, E.; El-Fassi, S. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 57, Issue 12.* - 2010, Page(s): 4001-4012.

Поступила 13.10.2012

*Жемеров Георгий Георгиевич, д.т.н., проф.*  
*Ильина Наталья Александровна, д.т.н., проф.*  
*Холод Ольга Игоревна, аспирант*  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника"  
61002, г. Харьков, ул. Фрунзе 21  
тел./факс: (057) 7076312  
e-mail: zhemerov@gmail.com, Olha.kov@mail.ru

*Тугай Дмитрий Васильевич, к.т.н., доц.*  
Харьковская национальная академия городского хозяйства  
кафедра "Теоретическая и общая электротехника"  
61002, Харьков, ул. Революции, 12  
тел. (057) 7073111, e-mail: tugai\_d@ukr.net

*Zhemerov G.G., Ilyina N.A., Tugay D.V., Kholod O.I.*  
**Subway power systems with modern semiconductor converters and energy storage devices.**

Five subway power systems, a traditional power system and power systems with an active rectifier and an energy storage device, are considered. Estimation of energy loss in the analyzed subway power systems circuits is made.

**Key words – active rectifier, subway power systems, efficiency, energy storage device, energy loss estimation.**