

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА

Г.Г.Жемеров¹, докт.техн.наук, Д.В.Тугай², канд.техн.наук, О.И.Холод¹

¹ – Национальный технический университет «ХПИ»

ул. Фрунзе, 21, 61002, Харьков, Украина,

² – Харьковский национальный университет городского хозяйства

ул. Революции, 12, 61002, Харьков, Украина.

Проведена сравнительная оценка энергоэффективности пяти возможных систем электроснабжения подвижного состава метрополитена, четыре из которых являются альтернативой существующей в Украине. Предложен метод оценки показателей энергетической эффективности систем электроснабжения, основанный на использовании понятий «энергия» и «потери энергии». Показано, что использование энергоемких накопителей энергии в системах электроснабжения метрополитена позволит не только уменьшить суммарный объем электроэнергии, потребляемый из сети, но и значительно сократить потери энергии при ее транспортировании и потреблении. Библ. 10, рис. 5, табл. 1.

Ключевые слова: система электроснабжения, подвижной состав, энергоэффективность, энергия, потери энергии, коэффициент полезного действия, рекуперация, накопитель энергии

Введение. Метрополитен (МП) является неотъемлемой частью транспортной системы современного крупного города, превосходящей по пассажиропотоку наземный муниципальный транспорт [6]. Последние исследования подчеркивают возрастающую роль городского электрического транспорта в формировании будущего облика мегаполиса [9]. В связи с этим МП сталкивается с проблемами обеспечения эффективности электроснабжения при сохранении надежности пассажирских перевозок в условиях увеличивающегося трафика.

Вопросы повышения энергетической эффективности особенно актуальны для украинских МП, где по сегодняшний день эксплуатируется подвижной состав с коллекторными двигателями постоянного тока и резистивным торможением, при котором кинетическая энергия движущегося электропоезда рассеивается в виде тепла в тормозных резисторах [5, 9]. По данным метрополитена затраты электроэнергии на питание поездов при такой системе электроснабжения (СЭ) составляют 80-95% от общих затрат электроэнергии [9]. Причем, значительная часть этой энергии теряется на тяговых подстанциях, в контактной сети, в тяговых электроприводах и их тормозных резисторах.

В работе [4], наряду с традиционной (СЭ 1), рассматривались четыре системы электроснабжения МП: с активным выпрямителем (АВ) и рекуперацией энергии в сеть (СЭ 2); с АВ и стационар-

ным накопителем энергии (НЭ) (СЭ 3); с АВ и бортовым накопителем энергии (СЭ 4) и бесконтактная СЭ с бортовым накопителем энергии (СЭ 5) (под этим термином понимается отсутствие контактной сети и подключение к стационарному источнику только на станциях). Были определены преимущества и недостатки каждой СЭ, однако остались несформулированными метод и методика определения их энергетической эффективности. Целью данной статьи является разработка метода и методики определения эффективности систем электроснабжения метрополитена. Следует отметить, что результаты исследования могут быть использованы для оценки энергетической эффективности практически любой СЭ с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии.

Мгновенная мощность сети в интервале движения подвижного состава. От выбранной системы электроснабжения МП будет зависеть форма графика мгновенной мощности, развиваемой электроприводом подвижного состава в полном интервале движения. Для удобства дальнейшего анализа разобьем полный интервал движения (T) на четыре одинаковых временных отрезка: время разгона электропоезда до номинальной скорости (t_{ac}), время движения с номинальной скоростью (после разгона) (t_{mov}), время торможения (t_{br}) и время стоянки поезда на станции (t_{st}). На практике соотношения указанных интервалов могут существенно отличаться от принятых здесь, но методология расчета показателей энергоэффективности от этого не изменится. На рис. 1,а представлены графики тока, напряжения и мощности нагрузки в интервале движения подвижного состава между станциями, соответствующие принятому ранее допущению

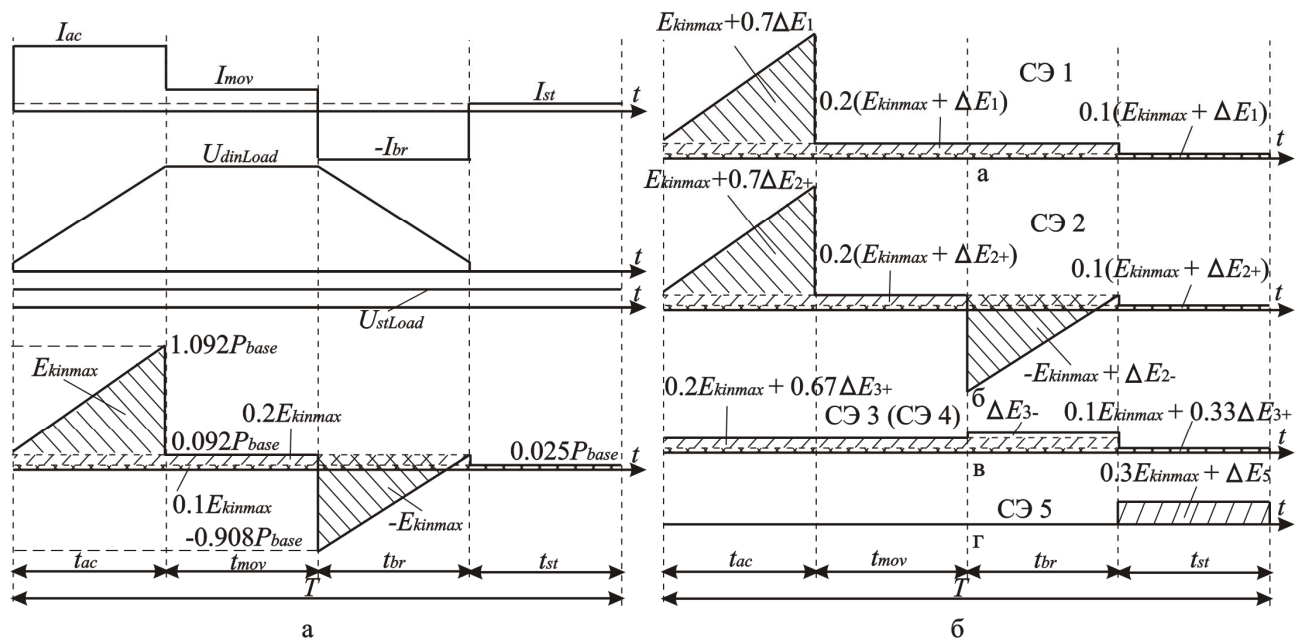


Рис. 1

$$t_{ac} = t_{mov} = t_{br} = t_{st} = \frac{T}{4}. \quad (1)$$

График мощности нагрузки учитывает энергию, потребляемую на электрическую тягу, и энергию, потребляемую прочим электротехническим оборудованием подвижного состава (освещение, связь, кондиционирование, привод дверей). Для удобства представления график мощности,

вспомогательной нагрузки, принят постоянным на всех четырех временных интервалах (см. рис. 1,а). Графики напряжений динамической и статической нагрузок представлены на рис. 1,а в виде двух отдельных зависимостей. Базовая мощность P_{base} на рис. 1,а определяется как отношение максимума кинетической энергии к интервалу разгона

$$P_{base} = \frac{E_{kinmax}}{t_{ac}} = \frac{4 \cdot E_{kinmax}}{T}. \quad (2)$$

При разгоне электропоезда двигатель постоянного тока развивает номинальный момент на валу, и мощность нагрузки линейно возрастает до базового значения P_{base} . С учетом энергии, потребляемой на собственные нужды ($E_{tr} = 0.1 \cdot E_{kinmax}$) и преодоление сопротивления качению и сопротивления воздуха в туннеле ($E_{move} = 0.2 \cdot E_{kinmax}$), максимальная мощность нагрузки составляет $P_{max} = 1.092 \cdot P_{base}$. После разгона поезд движется с постоянной скоростью и мощность нагрузки неизменна во времени и составляет 9.2% от базовой мощности (см. рис. 1). В интервале торможения кинетическая энергия, набранная поездом, уменьшается до нуля, после чего на интервале стоянки электропитание обеспечивается лишь для вспомогательного электротехнического оборудования состава.

На рис. 1,б показаны графики мощности сети для пяти выбранных систем электроснабжения. Форма графика мощности традиционной СЭ (рис. 1,ба) совпадает с формой графика нагрузки в интервалах t_{ac} , t_{mov} , t_{st} с учетом потерь энергии во всех элементах системы

$$\Delta E_1 = \Delta E_{S+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+} = \Delta E_{1+}, \quad (3)$$

где ΔE_{S+} , ΔE_{d+} , ΔE_{ASD+} – соответственно потери энергии в тяговой подстанции (трансформаторах, реакторах, выпрямителе и соединительных кабелях), контактной сети и элементах электропривода при потоке энергии из сети в нагрузку.

График мощности сети при СЭ с активным выпрямителем и рекуперацией энергии в сеть (рис. 1,бб) соответствует графику мощности нагрузки с учетом потерь в элементах системы при двунаправленном потоке энергии

$$\Delta E_2 = \Delta E_{S+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{S-} + \Delta E_{d-} + \Delta E_{ASD-} = \Delta E_{2+} + \Delta E_{2-}, \quad (4)$$

где ΔE_{S-} , ΔE_{d-} , ΔE_{ASD-} – соответственно потери энергии в устройствах тяговой подстанции (трансформаторах, реакторах, выпрямителе и соединительных кабелях), контактной сети и элементах электропривода при рекуперации энергии из нагрузки в сеть.

График мощности сети при СЭ с АВ и стационарным накопителем энергии (рис. 1,бв) соответствует потоку энергии, расходуемой на собственные нужды электропоезда, преодоление трения, и суммарным потерям энергии в элементах СЭ при двунаправленном потоке

$$\Delta E_3 = \Delta E_{S3+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d-} + \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{ES} = \Delta E_{3+} + \Delta E_{3-}, \quad (5)$$

где ΔE_{S3+} – приведенные потери энергии в устройствах тяговой подстанции в режиме 3, ΔE_{ES} – потери энергии в накопителе энергии.

График мощности сети при СЭ с АВ и бортовым накопителем энергии аналогичен графику мощности СЭ с АВ и стационарным накопителем энергии (рис. 1,бв) и отличается лишь уровнем суммарных потерь энергии в элементах СЭ

$$\Delta E_4 = \Delta E_{S4+} + \Delta E_{d4+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{ES} = \Delta E_{4+} + \Delta E_{4-}, \quad (6)$$

где ΔE_{S4+} , ΔE_{d4+} – соответственно приведенные потери энергии в элементах тяговой подстанции и контактной сети для четвертой СЭ.

На рис. 1,бг представлен график мощности сети бесконтактной СЭ с бортовым накопителем энергии. В интервале стоянки подвижного состава на станции t_{st} происходит подзарядка накопителя от сети. Энергия, закачиваемая в накопитель на этом промежутке времени, равна энергии, потребленной на собственные нужды, а также на преодоления сопротивления воздуха и трения с учетом суммарных потерь энергии в элементах системы электроснабжения

$$\Delta E_5 = \Delta E_{S5+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{ES5} = \Delta E_{5+} + \Delta E_{5-}, \quad (7)$$

где ΔE_{S5+} – приведенные потери энергии в устройствах тяговой подстанции для пятой СЭ, ΔE_{ES5} – потери в бортовом накопителе.

Расчет показателей эффективности систем электроснабжения. Определение показателей эффективности СЭ удобно проводить, оперируя понятием «энергия» [3]. Дальнейший расчет выполняется в относительных единицах, а за базисную величину принимается максимум кинетической энергии, приобретенной поездом во время разгона

$$E_{base} = E_{kin\max}. \quad (8)$$

Положим, что на собственные нужды подвижного состава затрачивается энергия, равная 10% от базисной величины, а на преодоление трения и сопротивления воздуха в туннеле – 20%. Тогда полезная энергия

$$E_{usf} = E_{kin\max} + E_{tr} + E_{move}, \quad (9)$$

или в относительных единицах

$$E_{usf*} = E_{kin\max*} + E_{tr*} + E_{move*} = 1 + 0.1 + 0.2 = 1.3. \quad (10)$$

Схема потока энергии через элементы традиционной СЭ представлена на рис. 2,а. Схема демонстрирует однонаправленный поток энергии из сети в нагрузку. Суммарная энергия, потребляемая из сети при традиционной СЭ, численно равна энергии, прошедшей через элементы СЭ в положительном потоке

$$E_{S1*} = E_{1+*} = E_{usf*} + \Delta E_{1*}. \quad (11)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) при закачке энергии в нагрузку

$$\eta_+ = \frac{E_{usf*}}{E_{1+*}}. \quad (12)$$

В схеме с рекуперацией энергии в сеть (рис. 2,б) в интервале торможения появляется обратный поток энергии из нагрузки в источник, при этом максимальная кинетическая энергия преобразу-

ется в электрическую энергию, которая через все элементы СЭ передается в сеть, претерпевая потери.

Суммарная энергия сети в полном интервале движения

$$E_{S2*} = E_{move*} + E_{tr*} + \Delta E_{2*} = E_{2+*} - E_{2-*}. \quad (13)$$

Из сопоставления рис. 2,а и рис. 2,б следует, что $E_{2+*} = E_{1+*}$ и $\Delta E_{2+*} = \Delta E_{1+*}$.

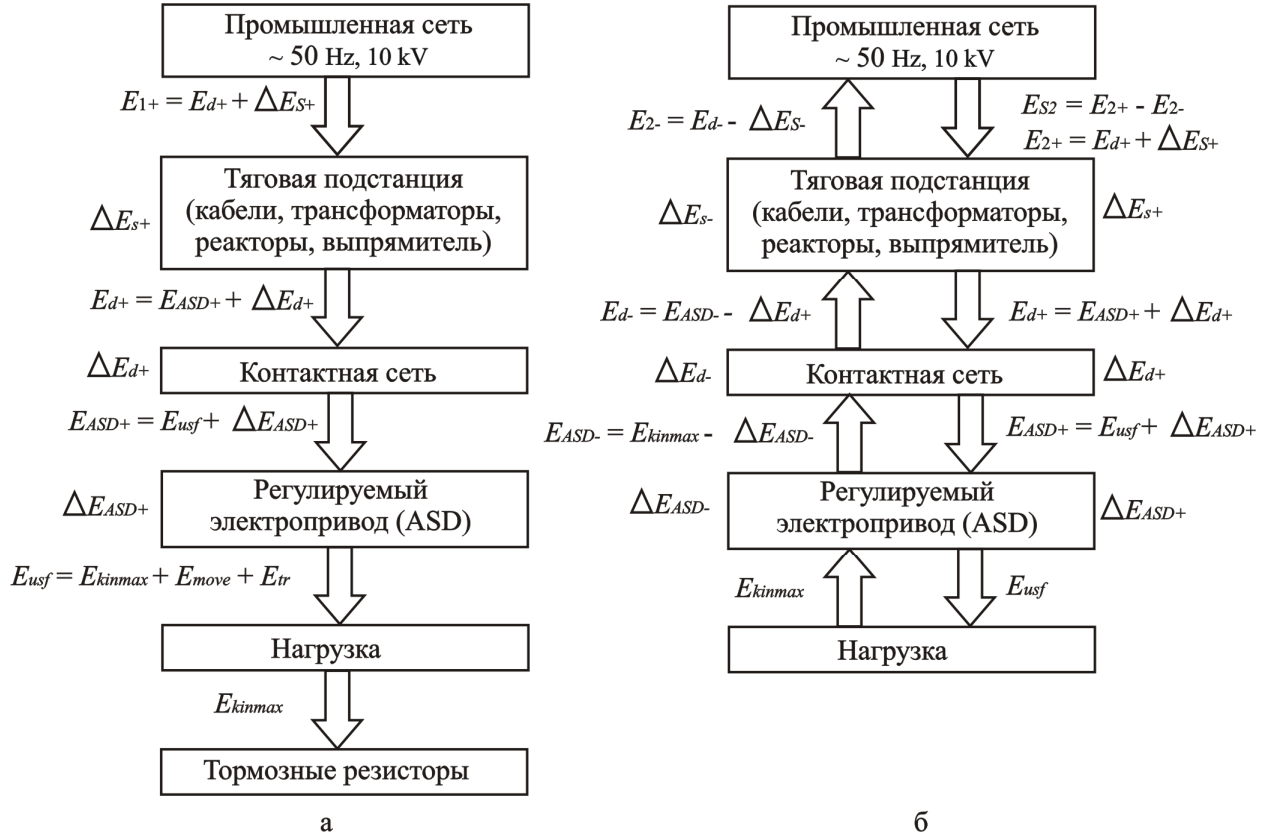


Рис. 2

При принятых выше относительных потерях в элементах СЭ пропорционально вычисляются потери энергии при ее рекуперации (см. рис. 2,б):

$$\Delta E_{ASD-*} = \Delta E_{ASD+*} \cdot \frac{E_{kinmax*}}{E_{usf*}}; \quad (14)$$

$$E_{ASD-*} = E_{kinmax*} - \Delta E_{ASD-*}, \quad (15)$$

где E_{ASD-*} – относительная энергия, прошедшая через регулируемый электропривод при рекуперации.

$$\Delta E_{d-*} = \Delta E_{d+*} \cdot \frac{E_{ASD-*}}{E_{usf*} + \Delta E_{ASD+*}} = \Delta E_{d+*} \cdot \frac{E_{ASD-*}}{E_{ASD+*}}; \quad (16)$$

$$E_{d-*} = E_{ASD-*} - \Delta E_{d-*}, \quad (17)$$

где E_{d-*} – относительная энергия, прошедшая через контактную сеть при рекуперации.

$$\Delta E_{s-*} = \Delta E_{s+*} \cdot \frac{E_{d-*}}{E_{ASD+*} + \Delta E_{d+*}} = \Delta E_{s+*} \cdot \frac{E_{d-*}}{E_{d+*}}; \quad (18)$$

$$E_{2-*} = E_{d-*} - \Delta E_{s-*}, \quad (19)$$

где $E_{2.*}$ – относительная энергия, рекуперлируемая в сеть, численно равная энергии в отрицательном потоке.

Суммарные потери энергии при двунаправленном потоке определяются как арифметическая сумма потерь энергии двух потоков.

КПД при закачке энергии в нагрузку для второй СЭ рассчитывается по соотношению (11). КПД при отборе энергии нагрузки

$$\eta_- = \frac{E_{-*}}{E_{kin\ max*}}. \quad (20)$$

Суммарный КПД, учитывающий работу СЭ в двух режимах

$$\eta_\Sigma = \frac{E_{usf*} - E_{kin\ max*}}{E_{+*} - E_{-*}} = \frac{E_{usf*} - E_{kin\ max*}}{E_{S*}}, \quad (21)$$

где E_{S*} – относительная энергия, потребляемая из сети.

Коэффициент возврата энергии из нагрузки в сеть в общем случае

$$k_E = \frac{E_{-*}}{E_{+*}}. \quad (22)$$

На рис. 3,а представлена условная схема потоков энергии в СЭ с АВ и стационарным накопителем.

Положительный поток энергии при этой системе электроснабжения уменьшается по сравнению с рассмотренными выше СЭ. Уменьшение положительного потока связано с уменьшением потерь энергии в элементах тяговой подстанции, в связи с тем, что через нее передается только энергия собственных нужд подвижного состава и энергия E_{move}

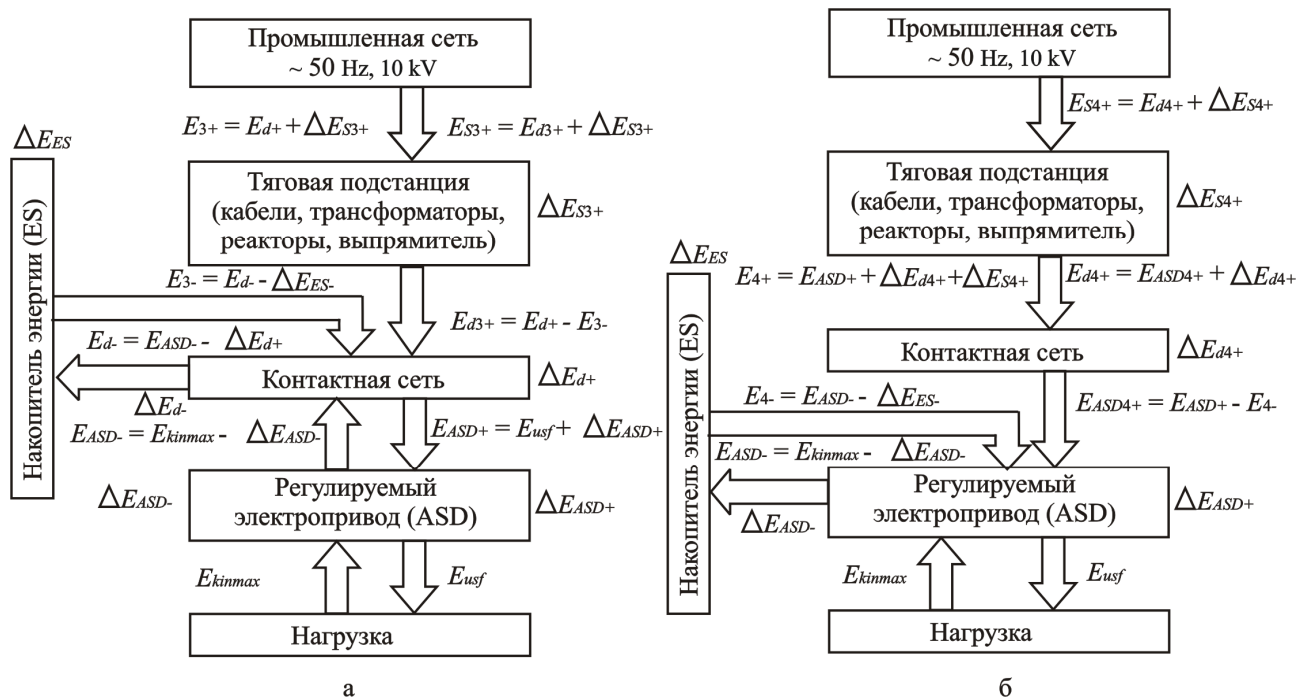


Рис. 3

$$\Delta E_{S3+*} = \Delta E_{S*} \cdot \frac{E_{d+*} - E_{d-*} - \Delta E_{ES*}}{E_{d+*}} = \Delta E_{S*} \cdot \frac{E_{d+*} - E_{3-*}}{E_{d+*}}, \quad (23)$$

где ΔE_{ES*} – относительные потери энергии в накопителе энергии.

Энергия через элементы СЭ в положительном потоке

$$E_{3+*} = E_{d+*} + \Delta E_{S3+*}. \quad (24)$$

Энергия, передаваемая через элементы СЭ со стационарным НЭ в отрицательном потоке, немного увеличивается за счет сокращения потерь при ее возврате (см. рис. 3,а), поэтому суммарная энергия, потребляемая из сети, уменьшится.

Коэффициенты полезного действия в СЭ со стационарным накопителем, а также коэффициент возврата энергии, могут быть рассчитаны по соотношениям (11), (19)-(21).

Схема потоков энергии в системе электроснабжения подвижного состава метрополитена с бортовым накопителем энергии представлена на рис. 3,б. Уменьшение пути прохождения основного потока энергии при размещении накопителя на подвижном составе приводит к еще большему снижению потока энергии, потребляемой из сети. Однако при такой СЭ необходимо учитывать возможное увеличение массы электропоезда, а значит и максимальной кинетической энергии

$$E_{kin\ max\ ES*} = E_{kin\ max*} + \Delta E_{kinES*}, \quad (25)$$

где ΔE_{kinES*} – приращение кинетической энергии за счет увеличения массы электропоезда.

Бортовое размещение НЭ позволяет уменьшить потери энергии в контактной сети в положительном потоке

$$\Delta E_{d4+*} = \Delta E_{d+*} \cdot \frac{E_{ASD+*} - E_{ASD-*} - \Delta E_{ES*}}{E_{ASD+*}} = \Delta E_{d+*} \cdot \frac{E_{ASD+*} - E_{4-*}}{E_{ASD+*}}, \quad (26)$$

а также потери в элементах тяговой подстанции

$$\Delta E_{S4+*} = \Delta E_{S+*} \cdot \frac{E_{ASD+*} + \Delta E_{d4+*} - E_{4-*}}{E_{d+*}}. \quad (27)$$

Энергия через элементы СЭ в положительном потоке

$$E_{4+*} = E_{ASD+*} + \Delta E_{d4+*} + \Delta E_{S4+*}. \quad (28)$$

На рис. 4 представлена схема потоков энергии бесконтактной СЭ с бортовым НЭ. Отсутствие контактной сети уменьшает потери энергии в положительном потоке по сравнению с рассмотренными выше системами электроснабжения. Тяговая подстанция в этой СЭ исполняет роль устройства подзарядки накопителя энергии. Потери энергии в элементах тяговой подстанции

$$\Delta E_{S5+*} = \Delta E_{S+*} \cdot \frac{E_{ASD+*} + \Delta E_{ES5*} - E_{ASD-*}}{E_{S1+*}} = \Delta E_{S+*} \cdot \frac{E_{ASD+*} + \Delta E_{ES5*} - E_{5-*}}{E_{S1+*}}, \quad (29)$$

где ΔE_{ES5*} – относительные потери энергии в накопителе при бесконтактной СЭ. В связи с тем, что от накопителя осуществляется электроснабжение подвижного состава в интервалах движения

$$\Delta E_{ES5*} > \Delta E_{ES*}. \quad (30)$$

Энергия через элементы бесконтактной СЭ в положительном потоке

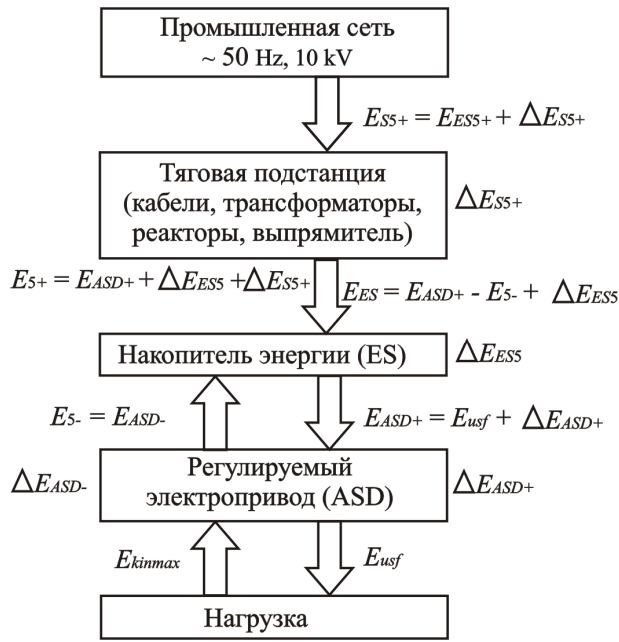


Рис. 4

от традиционной СЭ к системам электроснабжения, использующим НЭ.

Таблица

Номер схемы СЭ		СЭ 1	СЭ 2	СЭ 3	СЭ 4			СЭ 5		
Дополнительная кинетическая энергия, ΔE_{k*}		-	-	-	0	0.1	0.2	0	0.1	0.2
Суммарная энергия, потребляемая из сети, E_{S*}	P	1.565	0.744	0.681	0.496	0.562	0.63	0.462	0.521	0.58
	Э	1.565	0.743	0.684	0.496	0.562	0.634	0.462	0.526	0.583
Положительный поток энергии, E_{+*}	P	1.565	1.565	1.527	1.432	1.587	1.744	1.408	1.557	1.706
	Э	1.565	1.565	1.528	1.432	1.587	1.744	1.408	1.56	1.711
Отрицательный поток энергии, E_{-*}	P	0	-0.821	-0.846	-0.936	-1.025	-1.114	-0.946	-1.036	-1.126
	Э	0	-0.823	-0.844	-0.936	-1.023	-1.111	-0.946	-1.033	-1.12
Потери энергии в положительном потоке, ΔE_{+*}	P	0.265	0.265	0.227	0.132	0.157	1.184	0.108	0.127	0.146
	Э	0.265	0.265	0.228	0.132	0.157	0.183	0.108	0.13	0.152
Потери энергии в отрицательном потоке, ΔE_{-*}	P	1	0.179	0.154	0.064	0.075	0.086	0.054	0.064	0.074
	Э	1	0.177	0.156	0.064	0.076	0.089	0.054	0.067	0.079
Суммарные потери энергии, $\Delta E_{\Sigma*}$	P	1.265	0.444	0.381	0.196	0.232	0.27	0.162	0.191	0.22
	Э	1.265	0.442	0.384	0.196	0.233	0.272	0.162	0.196	0.3
КПД при закачке энергии в нагрузку, η_{+}	P	0.831	0.831	0.851	0.908	0.901	0.894	0.923	0.919	0.914
	Э	0.831	0.831	0.851	0.908	0.901	0.893	0.923	0.917	0.91
КПД при отборе энергии на грузки, η_{-}	P	0	0.821	0.846	0.936	0.932	0.928	0.946	0.942	0.938
	Э	0	0.823	0.844	0.936	0.931	0.925	0.946	0.94	0.933
Суммарный КПД, η_{Σ}	P	0.192	0.403	0.441	0.605	0.587	0.571	0.649	0.634	0.62
	Э	0.192	0.404	0.439	0.605	0.585	0.568	0.649	0.629	0.616
Коэффициент возврата энергии, k_E	P	0	0.524	0.554	0.654	0.646	0.639	0.672	0.666	0.66
	Э	0	0.526	0.552	0.654	0.645	0.637	0.672	0.662	0.654

Энергетическая эффективность системы электроснабжения подвижного состава выше при бортовом размещении накопителя энергии.

$$E_{5+*} = E_{ASD+*} + \Delta E_{ES5*} + \Delta E_{S5+*}.$$

В табл. (в строках «Р») представлены результаты расчета показателей эффективности пяти рассмотренных систем электроснабжения, выполненные с использованием соотношений (2)-(31). В качестве исходных были выбраны следующие данные: $\Delta E_{S+*} = 0.065$, $\Delta E_{d+*} = 0.13$, $\Delta E_{ASD+*} = 0.07$, $\Delta E_{ES*} = 0.01$, $\Delta E_{ES5*} = 0.02$. Для бортовых систем были рассчитаны энергетические показатели при возможном увеличении максимума кинетической энергии на 10 и 20%.

Теоретический расчет подтвердил ожидаемое увеличение коэффициентов полезного действия и коэффициента возврата энергии при переходе

Компьютерное моделирование систем электроснабжения. Для проверки теоретических положений была разработана эквивалентная Matlab-модель системы электроснабжения подвижного состава метрополитена, представленная на рис. 5. Модель позволяет получить энергетические характеристики пяти рассматриваемых систем электроснабжения в динамическом режиме.

Matlab-модель по рис. 5 состоит из четырех типов блоков:

1. Силовая схема (блоки 1-10).
2. Блоки задания параметров (блоки 11-14).
3. Измерительные блоки и подсистемы (блоки 15-17).
4. Регистрирующие виртуальные приборы (блоки 18-20).

Силовая схема эквивалентной Matlab-модели состоит из:

- источника напряжения (блок 1), имитирующего промышленную сеть;
- статической нагрузки (блок 4), выполненной в виде источника тока и имитирующей вспомогательное электротехническое оборудование электропоезда;
- динамической нагрузки (блок 5), выполненной в виде источника тока и имитирующей электропривод подвижной части. Блок 5 позволяет задавать любую форму графика мощности;
- накопителя энергии (блок 3);
- силовых контакторов (блок 2), выполняющих необходимые коммутации силовой схемы в зависимости от выбранной СЭ;
- резистивной нагрузки (блоки 6-10), выполненных в виде стандартных блочных элементов Series RLC Load библиотеки SimPowerSystems. Величина активной мощности рассчитывается математически в зависимости от выбранной СЭ. Блоки резисторов определяют потери в элементах системы электроснабжения (см. рис. 5).

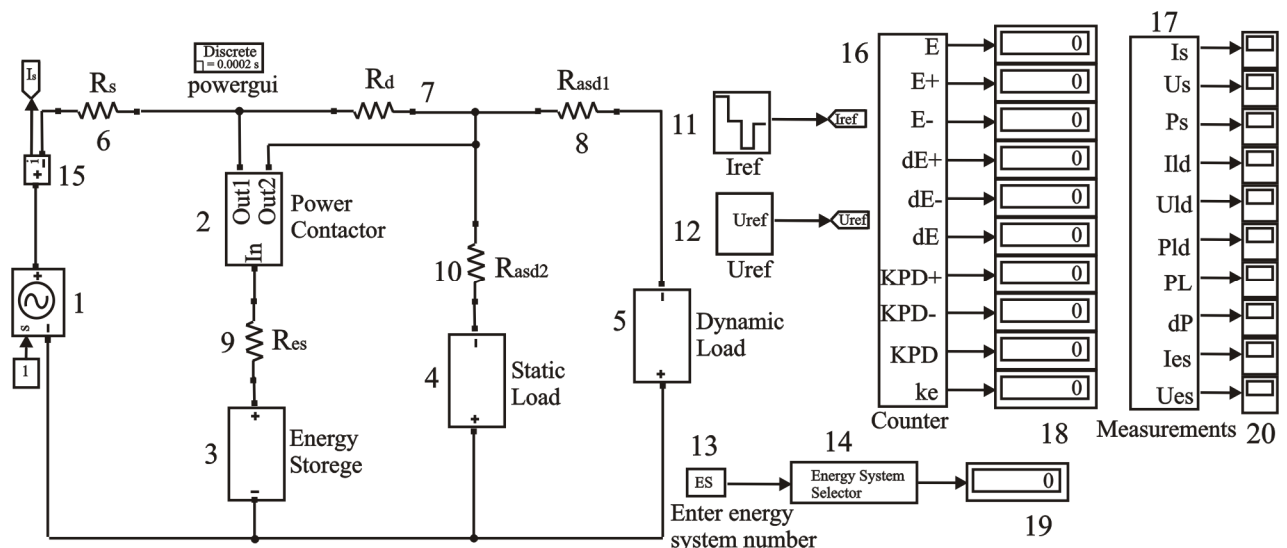


Рис. 5

Блоки задания параметров 11 и 12 позволяют задавать форму графика тока и напряжения динамической нагрузки. В данной модели с помощью этих блоков задаются мгновенные значения тока и напряжения двигателя постоянного тока. Блоки 13 и 14 позволяют произвести выбор исследуемой

системы электроснабжения путем указания соответствующего порядкового номера СЭ в свойствах модели.

Измерительная подсистема (блок 16) реализует функции цифрового счетчика, в выходные порты которого поступает информация о текущих значениях измеряемых параметров, регистрируемых дисплеями (блоки 18). Мгновенные значения токов, напряжений и мощностей силовой схемы рассчитываются в измерительной подсистеме (блок 17) и регистрируются блоками осциллографов (блоки 20).

Результаты измерений показателей эффективности пяти СЭ представлены в табл. в столбцах «Э». Сопоставляя данные виртуального компьютерного эксперимента с данными теоретического расчета можно сделать вывод о корректности разработанной методики определения эффективности систем электроснабжения метрополитена.

Выводы. Разработан метод оценки показателей энергетической эффективности систем электроснабжения подвижного состава метрополитена, основанный на использовании понятий потока энергии и потерь энергии.

С использованием разработанного метода для пяти разных СЭ были рассчитаны КПД в прямом и обратном потоке, суммарный КПД, а также коэффициент возврата энергии.

Сравнение пяти систем электроснабжения метрополитена по показателям эффективности, при допущении одинаковой длительности всех четырех временных интервалов графика движения электропоезда, позволяет сделать следующие заключения:

- повышения КПД можно добиться при переходе от традиционной СЭ к системам с накопителем энергии;

- СЭ с рекуперацией энергии в сеть позволяет в 2.1 раза сократить энергию, потребляемую из сети. Однако за счет двустороннего энергетического потока суммарные потери такой СЭ выше, чем у других альтернатив традиционной системе электроснабжения. Кроме того требуется решение проблемы согласования графика мощности при рекуперации с энергетической компанией;

- при использовании стационарного накопителя энергии, размещенного на территории тяговой подстанции, суммарная энергия, потребляемая из сети, сокращается в 2.3 раза при уменьшении суммарных потерь в 3.3 раза. Такая СЭ может стать наиболее эффективной при сооружении новых линий метрополитена,

- при переходе на СЭ с бортовым накопителем поток энергии, потребляемой из сети, сокращается в 2.5-3.1 раза при снижении потерь энергии в 4.6-6.4 раза. Однако установка НЭ на подвижном составе, помимо увеличения массы последнего, может сказаться на снижении пассажироместности. Возрастают требования к безопасности перевозки пассажиров при эксплуатации накопителей значительной емкости;

- наилучшими показателями энергетической эффективности обладает бесконтактная СЭ. Суммарная энергия, потребляемая из сети, такой системы электроснабжения сокращается в 2.7-3.4

раза при снижении потерь в 5.7-7.8 раза. Однако установка НЭ большой емкости на подвижном составе сопряжена с увеличением стоимости электрической энергии, потребляемой электропоездом, за счет ограниченного числа циклов заряда-разряда, необходимости обслуживания и дороговизны самого накопителя. Перспектива внедрения подобных систем электроснабжения зависит от технологического прогресса в области создания недорогих энергоемких накопителей энергии. Поэтому при проектировании конкретной СЭ подвижного состава метрополитена необходимо тщательное технико-экономическое сопоставление различных инженерных предложений с выбором оптимального варианта.

Разработанный метод оценки эффективности СЭ подвижного состава метрополитена может быть использован для практически любой системы электроснабжения с накопителями энергии.

Создана эквивалентная Matlab-модель, способная исследовать работу пяти рассмотренных СЭ в динамических режимах. Благодаря возможности задания любой формы графика мощности нагрузки модель обладает свойством универсальности. Результаты, полученные при моделировании, подтверждают корректность изложенных в работе теоретических положений.

1. *Бычкова М.П.* Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро // Электронный журнал «ЭНЕРГОСОВЕТ». – 2011. – №3.
2. *Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Тугай Д.В.* Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Силова електроніка та енергоефективність». – 2008. – Част. 2. – С. 80-87.
3. *Жемеров Г.Г., Ильина О.В.* Теория мощности Фризе и современные теории мощности // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 63-65.
4. *Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Тугай Д.В., Холод О.И.* Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 1. – С. 41-49.
5. *Жемеров Г.Г., Холод О.И.* Пути модернизации систем электроснабжения метрополитена // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2012. – Ч. 1. – С. 27-35.
6. *Хворост Н.В.* Концепция новой структуры системы электрической тяги для метрополитена // Коммунальное хозяйство городов. – 2003. – №53. – С. 172-179.
7. *Allègre A.-L., Bouscayrol A., Delarue P., Barrade P., Chattot E., El-Fassi S.* Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Volume 57. – Issue 12. – 2010. – P. 4001-4012.
8. *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.
9. <http://www.metro.kharkov.ua>
10. *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.

УДК 621.314

Енергоефективність систем електропостачання рухомого складу метрополітену

Г.Г.Жемеров¹, докт.техн.наук, Д.В.Тугай², канд.техн.наук, О.І.Холод¹

¹ – Національний технічний університет «ХПІ»

вул. Фрунзе, 21, 61002, Харків, Україна,

² – Харківський національний університет міського господарства

вул. Революції, 12, 61002, Харків, Україна.

Проведена порівняльна оцінка енергоефективності п'яти можливих систем електропостачання рухомого складу метрополітену, чотири з яких є альтернативою існуючим в Україні. Запропоновано метод оцінки показників енергетичної ефективності систем електропостачання, що базується на використанні понять «енергія» та «втрати енергії». Показано, що використання енергоємних накопичувачів енергії в системах електропостачання метрополітену дозволить не тільки зменшити сумарний об'єм електроенергії, що споживається з мережі, але й зменшити втрати енергії при її транспортуванні і споживанні. Бібл. 10, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: система електропостачання, рухомий склад, енергоефективність, енергія, втрати енергії, коефіцієнт корисної дії, рекуперація, накопичувач енергії.

Energy efficiency of power supply systems for a subway

G.G.Zhemerov¹, D.V.Tugay², O.I.Kholod¹

¹ – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”

Frunze str., 21, 61002, Kharkov, Ukraine,

² – Kharkov National Municipal University

Revolution str., 12, 61002, Kharkov, Ukraine.

Comparative assessment of five possible energy supply systems of rolling stock subway is carried out, four of which are an alternative to the existing in Ukraine. The method for evaluation of energy efficiency of power supply systems based on the use of the terms "energy" and "energy losses" is proposed. It is shown, that the use of energy-intensive energy storage in subway power systems will not only reduce the total amount of electricity consumed from the network, but also will reduce the energy loss during its transportation and consumption. References 10, figures 5, tables 1.

Key words: power system, rolling stock, energy efficiency, energy, energy loss, recuperation, energy storage

1. Bychkova M.P. The system of electric energy storage devices to improve energy efficiency in the metro // Electronic Journal "Energosvet." – 2011. – № 3. (Rus)

2. Zhemerov G.G., Ilna N.A., Ilna O.V., Tugay D.V. Reducing losses and improving the quality of electric energy in municipal power systems // Tehnichna elektrodynamika, Special Issue "Power electronics that energy efficiency". – 2008. – Part. 2. – P. 80-87. (Rus)

3. *Zhemerov G.G., Ilina O.V.* The theory of power Friese and modern theories of power // *Elektrotehnika i elektromehanika*, 2007. – № 6. – P. 63-65. (Rus)
4. *Zhemerov G.G., Ilina N.A., Tugay D.V., Kholod O.I.* Subway power supply systems with modern semiconductor converters and energy storage // *Elektrotehnika i elektromehanika*, 2013. – № 1. – P. 41-49. (Rus)
5. *Zhemerov G.G., Kholod O.I.* Ways to modernize subway electrical systems // *Tehnichna elektrodynamika. Special Issue " Power electronics that energy efficiency"*. – 2012. – Part 1. – P. 27-35. (Rus)
6. *Khvorost N.V.* The concept of the new structure of the electric traction system for the subway // *Komunalnoe Hozaystvo Gorodov*. – 2003. – №53 – P. 172-179. (Rus)
7. *Allègre A.-L., Bouscayrol A., Delarue P., Barrade P., Chattot E., El-Fassi S.* Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – Volume 57. – Issue 12. – 2010. – P. 4001-4012.
8. *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.
9. <http://www.metro.kharkov.ua>
10. *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.