

Г.Г. Жемеров, Д.С. Крылов, А.В. Машура

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

Мета. Метою статті є оцінка ККД системи електропостачання метрополітену, в якій використовується чотирихквADRантний привід постійного струму з рекуперацією енергії в мережу живлення в режимі гальмування. Методика. Для проведення досліджень використовувалася теорія електричних кіл, математичне моделювання в пакеті Matlab. Результати. Отримана теоретична залежність ККД СЕ з двонаправленим потоком енергії від коефіцієнта резистивного короткого замикання на клеммах навантаження. Теоретичний результат перевірений моделюванням. Наукова новизна. Розроблена еквівалентна схема системи електропостачання метрополітену з чотирихквADRантним приводом постійного струму і можливістю рекуперації енергії в мережу живлення в режимі гальмування, визначені її параметри, заданий графік руху електропоїзда. Практичне значення. Використання отриманих залежностей і результатів моделювання дозволить визначити напрямок перспективного розвитку системи електропостачання метрополітену, оптимізувати її енергоефективність. Бібл. 8, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: система електропостачання, енергія, коефіцієнт повернення енергії, коефіцієнт корисної дії, рекуперація енергії.

Цель. Целью статьи является оценка КПД системы электроснабжения метрополитена, в которой используется четырёхквADRантный привод постоянного тока с рекуперацией энергии в питающую сеть в режиме торможения. Методика. Для проведения исследований использовалась теория электрических цепей, математическое моделирование в пакете Matlab. Результаты. Получена теоретическая зависимость КПД СЭ с двонаправленным потоком энергии от коэффициента резистивного короткого замыкания на клеммах нагрузки. Теоретический результат проверен моделированием. Научная новизна. Разработана эквивалентная схема системы электроснабжения метрополитена с четырёхквADRантным приводом постоянного тока и возможностью рекуперации энергии в питающую сеть в режиме торможения, определены её параметры, задан график движения электропоезда. Практическое значение. Использование полученных зависимостей и результатов моделирования позволит определить направление перспективного развития системы электроснабжения метрополитена, оптимизировать её энергоэффективность. Библ. 8, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: система электроснабжения, энергия, коэффициент возврата энергии, коэффициент полезного действия, рекуперация энергии.

Введение. Функционирование транспортной системы современного крупного города невозможно без использования метрополитена, обеспечивающего значительную часть пассажирских перевозок. Его высокая надёжность сочетается с не самой высокой энергоэффективностью, что обусловлено применением коллекторного электропривода постоянного тока последовательного возбуждения без возможности возврата энергии в питающую сеть. Повышению коэффициента полезного действия (КПД) системы электроснабжения метрополитена посвящено много научных трудов [1-3]. Одним из решений проблемы энергосбережения является использование четырёхквADRантного электропривода постоянного тока, что даёт возможность организовать двонаправленный поток электрической энергии между источником и нагрузкой. Это позволит выводить накопленную в движущемся составе энергию обратно в промышленную сеть трёхфазного переменного тока, что, в свою очередь, должно повысить КПД всей системы электроснабжения метрополитена. Однако, как показано в [3], эффект энергосбережения от использования рекуперативного торможения не всегда очевиден. Он зависит от конфигурации используемой системы электроснабжения и режимов работы электропривода. При определённых условиях возможен эффект снижения суммарного КПД системы вследствие возникновения дополнительных потерь при возврате энергии в сеть.

Целью работы является оценка КПД системы электроснабжения метрополитена, в которой исполь-

зуется четырёхквADRантный привод постоянного тока с рекуперацией энергии в питающую сеть в режиме торможения.

Структура тяговой подстанции. Традиционная тяговая подстанция для преобразования переменного напряжения в постоянное использует неуправляемые диодные выпрямители, что не позволяет осуществить возврат энергии в питающую сеть. Для реализации возможного повышения эффективности схемы вместо диодных мостов необходимо использовать четырёхквADRантный тиристорный выпрямитель, представленный на рис. 1.

Сеть 6(10) кV представлена трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений u_{SA}, u_{SB}, u_{SC} . Параметры сети учтены активным сопротивлением R_0 . Параметры линии, соединяющей тяговую подстанцию и преобразовательный трехфазный трансформатор 6(10) кV / 0.71 кV, определяются активным сопротивлением R_1 . Сетевые обмотки трансформатора T_1 подключаются к сети 6(10) кV, а вентиляльные – к шестипульсному четырёхквADRантному мостовому выпрямителю $V S1 - V S12$. Потери в тиристорном мосте представлены эквивалентным источником противо-ЭДС уровня 1 V в прямом и обратном направлениях и перенесены в цепь постоянного тока. Параметры линии от трансформатора T_1 до выпрямительных мостов соответствуют активным сопротивлением R_2 . Нагрузка представлена двигателем постоянного тока (ДПТ)

© Г.Г. Жемеров, Д.С. Крылов, А.В. Машура

с независимым возбуждением. Параметры линии от управляемого выпрямителя (УВ) до двигателя постоянного тока учтены сопротивлением контактного рельса R_{KR} . Индуктивности в линии питания,

присутствующие там по факту, не участвуют в формировании потерь при передаче энергии, поэтому они перенесены в нагрузку и в эквивалентной схеме они не показаны.

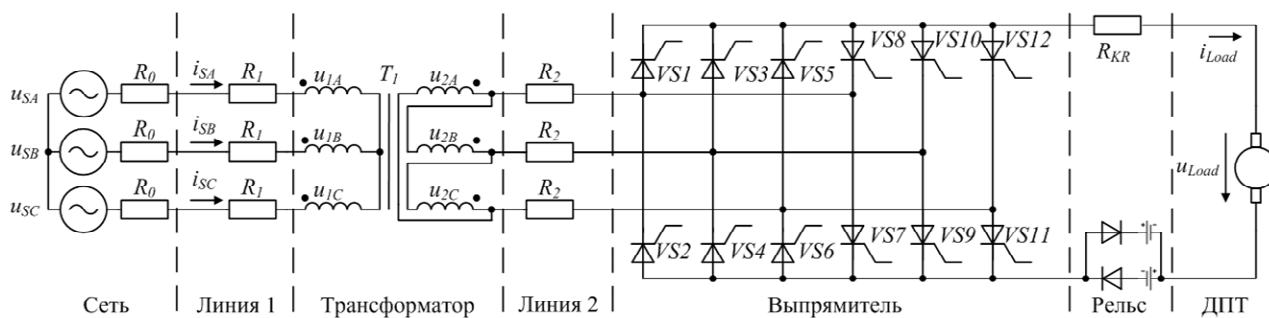


Рис. 1. Эквивалентная схема СЭ МП с четырехквadrантным УВ

Для адекватной оценки энергоэффективности системы электроснабжения метрополитена (СЭ МП) необходимо знать график движения поездов, который, согласно [1-3] содержит следующие интервалы: интервал разгона от нулевой до номинальной скорости (время t_{ac}) в среднем составляет 20-30 с; время торможения от номинальной до нулевой скорости (t_{br}) в среднем равно 40-50 с; интервал стоянки поезда (время t_{st}) обычно равен 25 с; интервал движения с номинальной скоростью (t_{mov}) составляет 110-130 с. Учитывая, что время движения подвижного состава между двумя станциями в среднем составляет три минуты [1], в соответствии с [3] примем следующие значения интервалов движения: $t_{ac} = 25$ с, $t_{mov} = 115$ с, $t_{br} = 45$ с, $t_{st} = 25$ с.

График изменения тока, напряжения и мощности нагрузки для указанных интервалов движения состава в рассматриваемой СЭ МП может иметь вид, представленный на рис. 2.

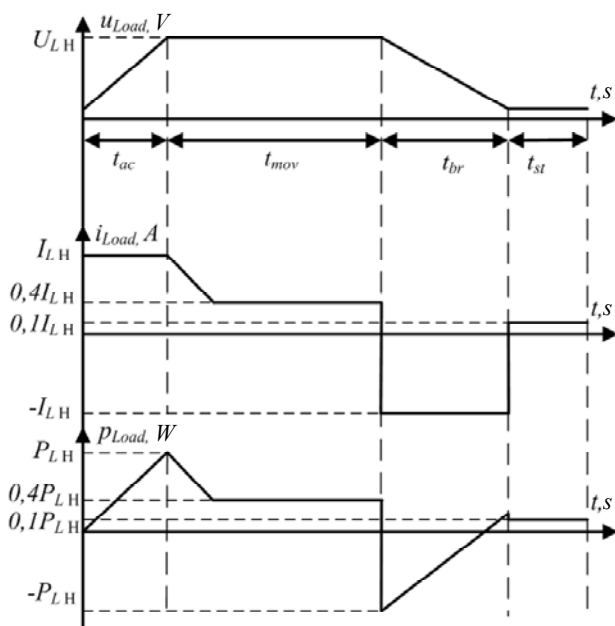


Рис. 2. График движения состава между станциями

В интервале разгона поезда t_{ac} система автоматического регулирования линейно изменяет скорость состава от нулевой до номинальной, что, при незави-

симом возбуждении МПТ, соответствует линейному росту напряжения нагрузки от нулевого до номинального значения. Ток нагрузки при этом ограничивается на номинальном уровне. Развиваемая на этом этапе мощность также линейно нарастает до номинального значения. В интервале движения t_{mov} с номинальной скоростью, к нагрузке будет приложено номинальное напряжение, а поезд преодолевает лобовое сопротивление воздуха и силу трения, развивая до 30-50 % от номинальной мощности. На этом же уровне будет находиться и потребляемый нагрузкой ток. В режиме торможения система автоматического регулирования обеспечивает плавное линейное снижение скорости до нулевого уровня за время t_{br} . Напряжение нагрузки также будет линейно снижаться до нулевого уровня. При этом для обеспечения возврата в питающую сеть запасённой поездом кинетической энергии, необходимо обеспечить смену полярности тока нагрузки с ограничением его на уровне, не превышающем номинального значения. С началом рекуперации ток нагрузки переходит на реверсивную вентильную группу и поддерживается отрицательным вплоть до момента достижения равенства возвращаемой и потребляемой составом энергии на этапе торможения. После этого изменяющаяся по линейному закону мощность нагрузки снова станет положительной, а ток нагрузки переходит на положительную вентильную группу в результате переключения мостов выпрямителя. В интервале стоянки t_{st} электропривод поезда энергии не потребляет. На всех этапах движения состав потребляет энергию собственных нужд, которая расходуется на обогрев, освещение и вентиляцию вагонов, её величина может достигать до 10 % от номинальной. Это учтено на графиках, представленных на рис. 2.

Развиваемая на этапах движения мощность зависит от физических параметров поезда, от его скорости и массы. Масса подвижного состава определяется числом вагонов и количеством пассажиров в каждом вагоне. В соответствии с [4], поезд состоит из пяти вагонов массой 33 т каждый. В вагон помещается от 200 до 300 пассажиров со средним весом 60-70 кг. Таким образом, можно считать, что масса поезда составляет 200-250 т. Номинальная скорость движения равна 25 м/с или 90 км/ч. Согласно [4], действующие на линиях метрополитена поезда оснащены электро-

приводом номинальной мощностью до 2 МВ. В эквивалентной схеме для дальнейших расчётов и моделирования был выбран двигатель типа NP800KS с номинальной мощностью 2.013 МВ и номинальным током 3053 А. Моменты сопротивления и инерции поезда приведены к его ротору.

Для расчёта энергии потерь при двунаправленном потоке необходимо задаться параметрами схемы СЭ МП, приведенной на рис. 1. Характеристики питающей сети определяются параметрами трёхфазного трансформатора питающей подстанции типа ТМН 4000/35/6 [1], для которого сопротивление фазы $R_0 = 0.1 \Omega$ [1]. Параметры линии 1 (см. рис.1) определяются расстоянием между тяговой подстанцией и преобразовательным трансформатором, которое, в среднем, составляет от 1 до 3 км [1]. Используемый в линии 1 алюминиевый трехжильный кабель имеет величину сопротивления фазы R_1 , равное $0.3 \Omega/\text{km}$, а его сечение выбирается по току, который может потреблять рассматриваемый электропривод, и равно 95 mm^2 [1]. Преобразовательный трансформатор серии ТСЗП-2500/10У3 6(10)/0.71 кВ имеет номинальную мощность 2.509 МВ и потери короткого замыкания 20 кВт. Суммарное эквивалентное сопротивление его фазы R_{TV} для него будет равно 2 мОм. Параметры линии 2 определяются расстоянием между преобразовательным трансформатором T_1 и выпрямителем, которое принято равным 50 м. При этом сечение медного кабеля будет равно 1000 mm^2 , величина сопротивления фазы $R_2 = 0.9 \text{ m}\Omega$. Стальной контактный рельс R_{KR} имеет стандартное сечение 6600 mm^2 и сопротивление, равное $9 \text{ m}\Omega/\text{km}$. Его длина может изменяться в диапазоне от 1 до 3 км, в зависимости от расположения поезда на прогоне между станциями. Активное сопротивление выбранной ранее машины постоянного тока (МПТ) R_J равно 8 мОм.

КПД СЭ МП с двунаправленным потоком энергии. Оценим КПД системы электроснабжения, представленной на рис. 1. Согласно [3], максимально возможный КПД СЭ с двунаправленным потоком энергии определяется по формуле:

$$\eta_{\max\leftrightarrow} = \frac{\eta_{\max\rightarrow}(2 - \eta_{\max\leftarrow}^{-1}) - k_E}{1 - k_E}, \quad (1)$$

где $\eta_{\max\rightarrow}$ и $\eta_{\max\leftarrow}$ – максимально возможное значение КПД трехфазной СЭ в прямом и обратном потоках энергии соответственно; k_E – коэффициент возврата энергии из нагрузки в источник, определяемый по выражению из [3]:

$$0 \leq k_E = \frac{P_{S\leftarrow}}{P_{S\rightarrow}} \leq 1, \quad (2)$$

где $P_{S\leftarrow}$ и $P_{S\rightarrow}$ – мощность источника в прямом и обратном потоках энергии соответственно.

Величину максимально возможного значения КПД СЭ МП в прямом потоке энергии $\eta_{\max\rightarrow}$ определяется по выражению [3]:

$$\eta_{\max\rightarrow} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{SC}}}, \quad (3)$$

где k_{SC} – коэффициент короткого замыкания, определяемый отношением мощности короткого замыкания на клеммах нагрузки к полезной активной мощности нагрузки:

$$k_{SC} = \frac{P_{SC}}{P_{usf}}, \quad (4)$$

где P_{SC} – мощность резистивного короткого замыкания СЭ МП при отключенной нагрузке; P_{usf} – среднее значение полезной активной мощности нагрузки в интервале повторяемости графика движения поезда согласно рис. 2.

Значения P_{usf} и k_E зависят от графика движения поезда, интервалов задания, скоростей разгона и торможения поезда. Мощность резистивного короткого замыкания P_{SC} зависит от конфигурации СЭ МП и может быть определена из соотношения:

$$P_{SC} = \frac{3U_{sm}^2}{2R_{\Sigma}}, \quad (5)$$

где U_{sm} – амплитуда синусоидального фазного напряжения источника электропитания; R_{Σ} – эквивалентное активное сопротивление СЭ МП, приведенной на рис. 1.

Величина активного эквивалентного сопротивления системы электроснабжения, согласно рис. 1, включает в себя следующие составляющие:

$$R_{\Sigma} = R_0' + R_1' + R_{TV} + R_2 + R_{RF} + R_{KR} + R_J, \quad (6)$$

где R_0' – сопротивление фазы источника переменного напряжения 6(10) кВ, приведенное к вторичной обмотке преобразовательного трансформатора (ПТ); R_1' – сопротивление фазы участка линии 1, приведенное ко вторичной обмотке ПТ; R_{TV} – суммарное сопротивление фазы ПТ; R_2 – сопротивление фазы участка линии 2 от трансформатора до выпрямителя; R_{RF} – сопротивление управляемого выпрямителя; R_{KR} – сопротивление контактного рельса; R_J – сопротивление якорной цепи ДПТ.

Величина максимально возможного значения КПД СЭ МП в обратном потоке энергии $\eta_{\max\leftarrow}$ может быть определена по следующему выражению [3]:

$$\eta_{\max\leftarrow} = \frac{1}{1 + k_E^2 k_{SC}^{-1}}. \quad (7)$$

Найдём величину максимально возможного КПД СЭ с двунаправленным потоком энергии и определим возможный диапазон его изменений, используя приведенные выше выражения.

Для определения коэффициента возврата энергии из нагрузки в источник k_E , согласно (2), необходимо знать $P_{S\leftarrow}$ и $P_{S\rightarrow}$. Их значения можно определить из графика движения поезда, приведенного на рис. 2. Вычислив площади под кривой графика изменения мощности для прямого и обратного потоков энергии, получим значения $P_{S\rightarrow} = 50.3 \text{ MW}$, $P_{S\leftarrow} = 108.7 \text{ MW}$ и, в соответствии с (2), $k_E = 0.5$.

Среднее значение полезной активной мощности нагрузки найдём интегрированием графика мгновенной мощности в интервале повторяемости движения поезда. Получили значение $P_{usf} = 1.44 \text{ MW}$.

Для нахождения мощности резистивного короткого замыкания P_{SC} определим составляющие эквивалентного активного сопротивления системы электропитания R_2 и возможный диапазон их изменений.

Согласно перечисленным выше данным, приведенное сопротивление фазы источника R_0' может быть вычислено по выражению:

$$R_0' = kR_0, \quad (8)$$

где $k = 1/k_r^2$ – коэффициент приведения параметров элементов первичной обмотки преобразовательного трансформатора ко вторичной, равный 0.014. Значение сопротивления R_0' равно 1.4 мΩ.

Аналогично вычисляется приведенное сопротивление фазы линии 1 R_1' :

$$R_1' = kR_1. \quad (9)$$

Остальные составляющие выражения (6) и возможный диапазон их изменения были определены выше, значения параметров сведены в табл. 1, в соответствии с которой сопротивление R_1' лежит в диапазоне от 4.2 мΩ до 12.6 мΩ. Активное эквивалентное сопротивление СЭ R_2 , приведенной на рис. 1, будет иметь значения в диапазоне от 27 мΩ до 44 мΩ.

Таблица 1
Сопротивления схемы СЭ МП и диапазон их изменений

Параметр		Значение
$R_0', m\Omega$		1.4
$R_1', m\Omega$	1000 m	4.2
	2000 m	8.4
	3000 m	12.6
$R_{TV}, m\Omega$		3
$R_2, m\Omega$		1
$R_{RF}, m\Omega$		1
$R_{KR}, m\Omega$	1000 m	9
	2000 m	13.5
	3000 m	18
$R_f, m\Omega$		8

Мощность короткого замыкания P_{SC} , рассчитанная по (5), в зависимости от параметров схемы, имеет значение от 34 до 56 МВ. Коэффициент короткого замыкания, рассчитанный по (4), в зависимости от активного эквивалентного сопротивления, лежит в диапазоне от 25 до 40.

В реальной системе электроснабжения могут присутствовать дополнительные потери электроэнергии, которые можно учесть в теоретических расчетах введением коэффициента дополнительных потерь k_{add} . В этом случае, КПД СЭ МП может быть рассчитано из [3] по выражению:

$$\eta_{real\leftrightarrow} = \frac{1 - k_E^2 k_{SC}^{-1} k_{add\leftarrow} - k_E}{1 + \left(\left(0.5 + \sqrt{0.25 - k_{SC}^{-1}} \right)^{-1} - 1 \right) k_{add\rightarrow}} \cdot (10)$$

График зависимости реального КПД СЭ с двунаправленным потоком энергии от коэффициента короткого замыкания на клеммах нагрузки k_{sc} приведен на рис. 3 пунктирной линией.

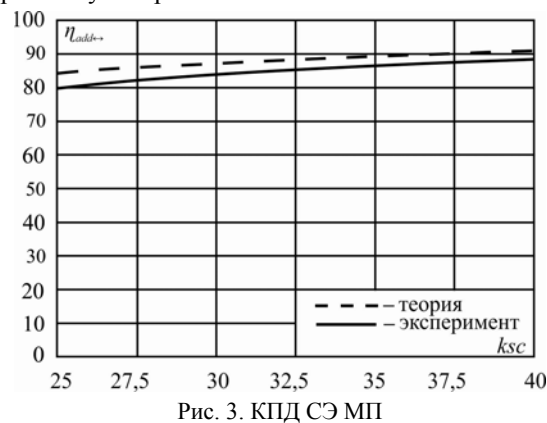


Рис. 3. КПД СЭ МП

Моделирование СЭ МП с двунаправленным потоком энергии. Для экспериментальной проверки теоретических результатов была разработана *MatLab*-модель СЭ МП с четырехквadrантным управляемым выпрямителем, имитирующая схему, приведенную на рис. 1. *MatLab*-модель изображена на рис. 4. Она состоит из следующих блоков:

- силовая схема – блоки 1, 3, 4, 5, 7, 8, 10;
- система управления тиристорными УВ – блок 6;
- регуляторы момента, тока и скорости – блоки 9, 13;
- датчик тока и напряжения – блок 2;
- расчетчик – блок 11;
- многолучевой осциллограф – блок 12.

Назначение блоков силовой схемы: 1 – промышленная сеть; 3 – кабели, соединяющей тяговую подстанцию и преобразовательный трехфазный трансформатор 6(10) кВ / 0.71 кВ, который обозначен блоком 4; 5 – кабели, идущие от трансформатора 4 до выпрямительных мостов 7; 8 – стальной контактный рельс, соединяющий УВ с двигателем постоянного тока 10.

Параметры элементов силовой цепи в модели были заданы в строгом соответствии с данными СЭ МП, приведенными ранее. Данные модели двигателя постоянного тока соответствуют таковым для машины типа *NP800KS*. Механическая часть электропривода была приведена к ротору машины постоянного тока, а кинетическая энергия, запасаемая составом при движении – к энергии эквивалентного маховика. Задаваемая в блоке 9 нагрузка МПТ учитывает как потери собственных нужд, так и потери на трение и лобовое сопротивление воздуха движущемуся составу.

Система управления выпрямителем построена по вертикальному принципу и имеет арксинусоидальную характеристику фазосмещающего устройства. Логика переключения мостов отслеживает сигнал задания с выхода регулятора и мгновенную величину тока нагрузки, принимая решение на перевод импульсов в зависимости от их суперпозиции.

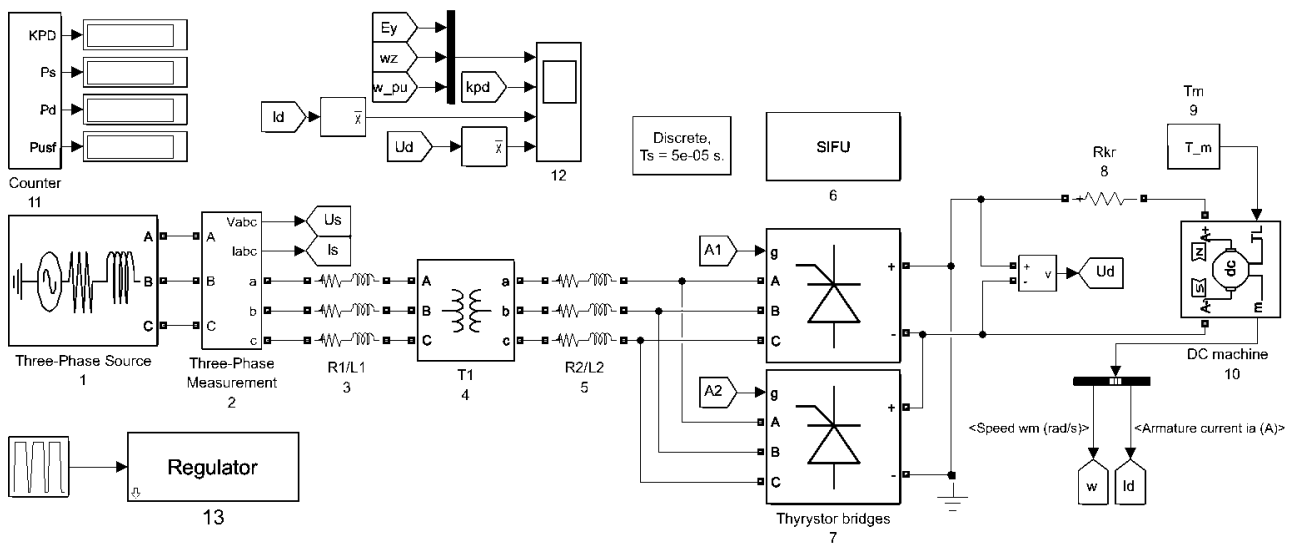


Рис. 4. MatLab –модель СЭ МП

Система авторегулирования выполнена по замкнутому принципу с использованием двухконтурного подчинённого регулятора тока-скорости, настроенного на технический оптимум. Это обеспечило качественное поддержание заданной скорости в соответствии с графиком движения поезда.

В результате моделирования получены: осциллограммы изменения тока, напряжения и скорости потока энергии для интервалов движения состава в рассматриваемой СЭ МП, приведенные на рис. 5. Построен график зависимости реального КПД СЭ с двунаправленным потоком энергии от коэффициента короткого замыкания на клеммах нагрузки, который, для наглядности, был приведен на рис. 3, совместно с теоретическим графиком.

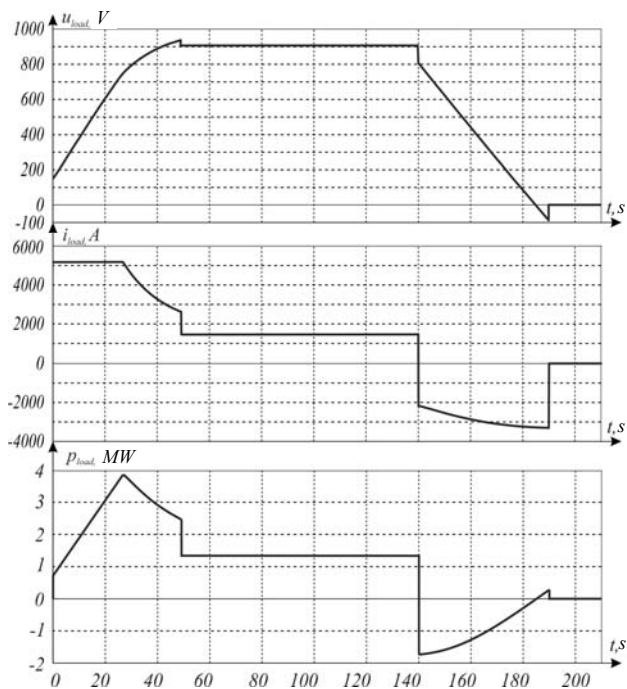


Рис. 5. Осциллограммы работы схемы

Выводы.

1. Разработана эквивалентная схема системы электроснабжения метрополитена с четырёхквadrantным

приводом постоянного тока и возможностью рекуперации энергии в питающую сеть в режиме торможения, определены её параметры, задан график движения электропоезда.

2. С использованием известных формул для разработанной системы электроснабжения получена теоретическая зависимость КПД СЭ с двунаправленным потоком энергии от коэффициента резистивного короткого замыкания на клеммах нагрузки.

3. Построена *MatLab*-модель СЭ МП с четырёхквadrantным электроприводом постоянного тока на базе шестипульсного мостового управляемого выпрямителя с возможностью реализации двунаправленного потока электрической энергии между источником и нагрузкой.

4. С использованием *MatLab*-модели снята реальная зависимость КПД СЭ с двунаправленным потоком энергии от коэффициента короткого замыкания на клеммах нагрузки, повторяющая динамику теоретической кривой. Некоторое расхождение между теоретической кривой и данными полученной модели может быть объяснено учетом в модели дополнительных потерь электроэнергии, таких, как трение, сопротивление воздуха, коммутационные потери и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Тугай Д.В., Холод О.И. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии // *Электротехника і електромеханіка*. – 2013. – №1. – С. 41-49. doi: 10.20998/2074-272X.2013.1.10.
2. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В., Холод О.И. Энергоэффективность систем электроснабжения подвижного состава метрополитена // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – №1. – С. 67-74.
3. Жемеров Г.Г., Ильина Н.О., Машура А.В., Тугай Д.В. Энергоэффективность рекуперативного гальмування в системах електропостачання з регульованими електроприводами // *Технічна електродинаміка*. – 2018. – №6. – С. 73-76. doi: 10.15407/techned2018.06.073.
4. Электровагоны типов 81-718/719, 81-718.0/719.0 и 81-718.2/719.2. Режим доступа: <http://vagon.metro.ru/passenger/81-718.html>.
5. Костин Н.А., Никитенко А.В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффектив-

ной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока // Залізничний транспорт України. – 2014. – №3. – С. 15-23.

6. Щербак Я.В., Нерубацький В.П. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України // Залізничний транспорт України. – 2011. – №2. – С. 30-34.

7. Саблін О.И. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – №38. – С. 187-190.

8. Посохов І.М. Дослідження ринку вагонобудування України та конкурентоспроможності промислових підприємств залізничного транспорту на світовому ринку та ринку країн СНД // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – №60. – С. 115-118.

REFERENCES

1. Zhemerov G.G., Pyina N.A., Tugay D.V., Kholod O.I. Subway power systems with modern semiconductor converters and energy storage devices. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.1, pp. 41-49. (Rus) doi: 10.20998/2074-272X.2013.1.10.

2. Zhemerov G.G., Tugay D.V., Kholod O.I. Energy efficiency of power supply systems for a subway. *Technical electrodynamics*, 2014, no.1, pp. 67-74. (Rus).

3. Zhemerov G.G., Pyina N.A., Mashura A.V., Tugay D.V. Efficiency of regenerative braking in energy supply systems with electric regulated drives. *Technical electrodynamics*, 2018, no.8, pp. 73-76. (Ukr). doi: 10.15407/teched2018.06.073.

4. *Electric carriage types 81-718/719, 81-718.0/719.0 and 81-718.2/719.2*. Available at: <http://vagon.metro.ru/passenger/81-718.html> (Accessed 12 May 2016). (Rus).

5. Kostin N.A., Nikitenko A.V. Autonomy of recuperative braking – the basis of reliable energy-efficient recovery on the electromotive force constant current. *Railway Transport of Ukraine*, 2014, no.3, pp. 15-23. (Rus).

6. Shcherbak Ya.V., Nerubatsky V.P. Analysis of the use of recuperative inhibition on the railways of Ukraine. *Railway Transport of Ukraine*, 2011, no.2, pp. 30-34. (Ukr).

7. Sablin O.I. Analysis of the quality of the recovered electricity in the electric transport system. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no.38, pp. 187-190. (Rus).

8. Posokhov I.M. Research of the car-building market of Ukraine and competitiveness of the industrial enterprises of railway transport in the world market and CIS markets. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.60, pp. 115-118. (Ukr).

Поступила (received) 05.06.2019

Жемеров Георгий Георгиевич¹, д.т.н., проф.,

Крылов Денис Сергеевич¹, к.т.н., доц.,

Машура Артём Вячеславович¹, аспирант,

¹Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,

тел/phone +380 577076312,

e-mail: zhemerov@gmail.com

G.G. Zhemerov¹, D.S. Krylov¹, A.V. Mashura¹

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Energy efficiency of the subway electrical supply system with electrical energy recovery at braking.

Purpose. The purpose of the paper is to assess the efficiency of the subway power supply system, which uses a four-quadrant DC drive with energy recovery in the supply network in the braking mode. **Methodology.** We have applied the theory of electrical circuits and mathematical simulation in Matlab package. **Results.**

The theoretical dependence of the efficiency of the electrical supply system with a bidirectional flow of energy on the coefficient of resistive short circuit at the load terminals has been obtained. The theoretical result is verified by modeling. **Originality.** The equivalent circuit of the subway power supply system with a four-quadrant DC drive and the possibility of energy recovery to the supply network in braking mode is developed, its parameters are determined, and the schedule of the electric train movement was set. **Practical value.** The use of the obtained dependencies and simulation results will allow to determine the direction of the future development of the subway power supply system and optimize its energy efficiency. References 8, tables 1, figures 5.

Key words: power supply system, energy, energy return coefficient, efficiency, energy recovery.