

О.В. Бялобржеський*

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева 20, м. Кременчук, Полтавської обл., 39600, Україна
Телефон: +380 96 2525717, E-mail: seemal@kdu.edu.ua
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1669-4580>

А.І. Гладир

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева 20, м. Кременчук, Полтавської обл., 39600, Україна
Телефон: +380 50 9008110, E-mail: andrii.gladyr@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3521-9112>

В.Ю. Ноженко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева 20, м. Кременчук, Полтавської обл., 39600, Україна
Телефон: +380 66 1797254, E-mail: nozhenkovika@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0126-6970>

**ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ КЕРОВАНИЙ
КОНДЕНСАТОРНИЙ НАКОПИЧУВАЧ – ДВИГУН ПОСТІЙНОГО
СТРУМУ**

На залізниці з системою тягового електропостачання змінного струму напругою 25кВ в переважній більшості експлуатуються локомотиви ВЛ-80. Електропривод більшості типів таких локомотивів забезпечує гальмування з рекуперацією. Для зниження перетоку енергії через тяговий трансформатор та контактну мережу розроблені технічні рішення пристроїв з накопичувачами енергії. Робота присвячена синтезу моделі системи керування конденсаторний накопичувач – двигун постійного струму тягового комплексу електровозу та дослідженню енергетичних процесів в ній. Запропонована схема системи для реалізації динамічних режимів тягового комплексу електровозу, що дозволяє забезпечити накопичення надлишкової енергії, яка виробляється електродвигуном в процесі гальмування, на конденсаторному накопичувачі та в її подальшому використанні в режимі розгону. Схема системи накопичення електричної енергії на конденсаторі забезпечує формування необхідного струму розгону/гальмування. Для цього в систему введено блок який за бажаною траєкторією зміни швидкості визначає відповідний динамічний момент та реалізує формування динамічного струму. Для дослідження енергетичних процесів в статичному та динамічному режимах розроблена математична модель у пакеті Matlab тягового електротехнічного комплексу з електродвигуном постійного струму НБ-418К6.

© Бялобржеський О.В., Гладир А.І., Ноженко В.Ю., 2022

Зважаючи на високу механічну інерційність залізничного складу, для зменшення часу моделювання, виконано приведення моменту інерції. Модель дозволяє реалізувати режими розгону, сталого руху, гальмування електровоза та розраховувати енергетичні параметри: енергію рухомих мас електровозу, енергію конденсатора, втрати енергії якоря, корисну механічну енергію. У результаті попередніх експериментів отримані часові діаграми, які відбивають зміну електричних параметрів двигуна та енергетичних параметрів відповідних кіл.

За допомогою розробленої математичної моделі проведено низку експериментів з варіацією параметрів системи та досліджено енергетичні показники при зміні значень буферної індуктивності, ємності конденсатора та амплітуди пульсацій струму. У результаті аналізу проведених досліджень встановлено, що втрати якоря сильно залежать від величини буферної індуктивності, суттєва зміна амплітуди пульсацій струму та ємності конденсаторного накопичувача енергії викликає незначну зміну енергетичних показників.

Ключові слова: енергетичні показники, керований конденсаторний накопичувач, двигун постійного струму, тяговий комплекс електровозу.

А.В. Бялобржеский*

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская 20, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39600, Украина
Телефон: +380 96 2525717, E-mail: seemal@kdu.edu.ua
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1669-4580>

А.И. Гладыр

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская 20, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39600, Украина
Телефон: +380 50 9008110, E-mail: andrii.gladyr@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3521-9112>

В.Ю. Ноженко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская 20, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39600, Украина
Телефон: +380 66 1797254, E-mail: nozhenkovika@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0126-6970>

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЯЕМЫЙ КОНДЕНСАТОРНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На железной дороге с системой тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25кВ в большинстве случаев эксплуатируются локомотивы ВЛ-80. Электропривод большинства типов таких локомотивов обеспечивает торможение с рекуперацией. Для снижения перетока энергии через тяговый трансформатор и контактную сеть разработаны технические решения уст-

ройств с накопителями энергии. Работа посвящена синтезу модели системы управляемый конденсаторный накопитель – двигатель постоянного тока тягового комплекса электровоза и исследованию энергетических процессов в ней. Предложена схема системы для реализации динамических режимов тягового комплекса электровоза, позволяющая обеспечить накопление избыточной энергии, производимой электродвигателем в процессе торможения, на конденсаторном накопителе и в дальнейшем использовании в режиме разгона. Схема системы накопления электрической энергии на конденсаторе обеспечивает формирование требуемого тока разгона/торможения. Для этого в систему введен блок, который по желаемой траектории изменения скорости определяет соответствующий динамический момент и реализует формирование динамического тока. Для исследования энергетических процессов в статическом и динамическом режимах разработана математическая модель в пакете Matlab тягового электротехнического комплекса с электродвигателем постоянного тока НБ-418К6.

Ввиду высокой механической инерционности железнодорожного состава для уменьшения времени моделирования выполнено приведение момента инерции. Модель позволяет реализовать режимы разгона, устойчивого движения, торможения электровоза и рассчитывать энергетические параметры: энергию движущихся масс электровоза, энергию конденсатора, потери энергии якоря, полезную механическую энергию. В результате предварительных экспериментов получены временные диаграммы, отражающие изменение электрических параметров двигателя и энергетических параметров соответствующих цепей.

С помощью разработанной математической модели проведен ряд экспериментов с вариацией параметров системы и исследованы энергетические показатели при изменении значений буферной индуктивности, емкости конденсатора и амплитуды пульсаций тока. В результате анализа проведенных исследований установлено, что потери якоря сильно зависят от величины буферной индуктивности, существенное изменение амплитуды пульсаций тока и емкости накопителя конденсаторного энергии вызывает незначительное изменение энергетических показателей.

Ключевы слова: энергетические показатели, управляемый конденсаторный накопитель, двигатель постоянного тока, тяговый комплекс электровоза.

Вступ Залізничний транспорт – це не тільки споживач продукції паливно-енергетичного комплексу країни, але одночасно й технологічна ланка в колі виробництва, передачі та споживання електроенергії. Основну частину енергетичних витрат електрифікованих залізничних доріг складають витрати на тягу потягів. В разі цього ресурсо- та енергозберігаючі технології необхідно впроваджувати саме в системах електропоспоживання тягового електротехнічного комплексу.

Одними з основних причин підвищення енергетичних витрат в електротехнічних комплексах електровозів являються нерівномірний графік руху та нерівномірний режим енергоспоживання кожної одиниці електрорухомого складу [1]. Проблема нерівномірності енергоспоживання в тягових електротехнічних комплексах не зникає і при використанні режимів рекуперативного гальмування для часткового повернення енергії в первинну мережу за умов використання інверторів на тягових підстанціях [2]. Вирішити проблеми неузгодженості в режи-

мах роботи джерела живлення та споживача найбільш ефективно можливо за допомогою накопичувачів енергії, які дозволять розділити в часі потрібні порції генерованої та споживаної потужностей [3].

Розповсюджені технічні рішення з підвищення якості електроспоживання тяговим електротехнічним комплексом електровоза за рахунок компенсації реактивної потужності [4], а також за рахунок накопичення електричної енергії [5]. При цьому авторами розглядаються узагальнені питання функціонування пропонуваніх рішень [6] або енергетичні показники відносно технічних параметрів локомотива [7]. Питання моделювання режимів та дослідження енергетичних процесів у системі накопичувач – двигун розглянуті недостатньо.

Мета роботи. Розробка математичної моделі та дослідження енергетичних процесів в системі керований конденсаторний накопичувач – двигун постійного струму.

Матеріали та результати досліджень. Електровози та електропотяги мають високі економічні показники і ряд технічних переваг у порівнянні з локомотивами інших видів. Найбільше поширення на мережі залізниць отримали серійні магістральні двосекційні електровози ВЛ80 всіх різновидів, обладнані колекторними тяговими електродвигунами. Даний тип електровоза є основним вантажним локомотивом залізничних ліній, електрифікованих на змінному струмі напругою 25 кВ та частотою 50 Гц. Ці електровози спочатку будувалися з установками, що перетворюють змінний струм високої напруги в постійний пульсуючий струм більш низької напруги з допомогою тягового трансформатора та ігнітотронних випрямлячів, а потім з кремнієвими випрямлячами.

Режими рекуперативного гальмування та пристрої, які їх реалізують, у серії ВЛ80 реалізовані в модифікації «р», для чого використаний випрямно-інверторний перетворювач ВІП [8]. ВЛ80р одна з останніх модифікацій серії.

Основним ускладненням використання режиму рекуперативного гальмування є не перетворення кінетичної енергії в електричну і повернення її в контактну мережу, а здатність мережі прийняти цю додаткову енергію. Це можливо при споживанні енергії з мережі іншими транспортними засобами в режимі тяги або шляхом передачі її в трифазну мережу змінного струму. Для цього необхідно перетворювати постійну напругу в трифазне змінне, синхронізоване з мережею за частотою і амплітудою.

Всі зазначені недоліки можна усунути, оснастивши тягові підстанції ємнісними накопичувачами, які брали б надлишкову енергію гальмування з наступним поверненням її в контактну мережу при пуску і розгоні поїздів [9], але при цьому не виключаються витрати в мережі.

На рис. 1 приведена схема запропонованого пристрою для реалізації динамічних режимів тягового комплексу електровозу. Дана система дозволяє забезпечити накопичення надлишкової енергії, яка виробляється електродвигуном в процесі гальмування, на конденсаторному накопичувачі та в її подальшому використанні в режимі розгону.

У стаціонарному режимі живлення якірних обмоток двигунів здійснюється від тиристорного випрямно-інверторного перетворювача, з'єднаного через трансформатор напруги з мережею змінного струму через струмоприймач (пантограф).

Випрямна установка збудження подає на обмотки збудження тягових електродвигунів струм, близький до номінального струму. При постійній швидкості обертання двигунів і постійному струмі обмоток збудження тягових

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

двигунів кола якірних обмоток тягових двигунів являють собою джерела електрорушійної сили постійної напруги.

У динамічному режимі для реалізації гальмування (розгону) тиристорний випрямно-інверторний перетворювач блокується шляхом припинення формування імпульсів управління, блок керування конденсаторним накопичувачем енергії на підставі поточних значень струму та напруги якірних обмоток та струму конденсаторного накопичувача енергії, формує на виході сигнал управління конденсаторним накопичувачем енергії [10].

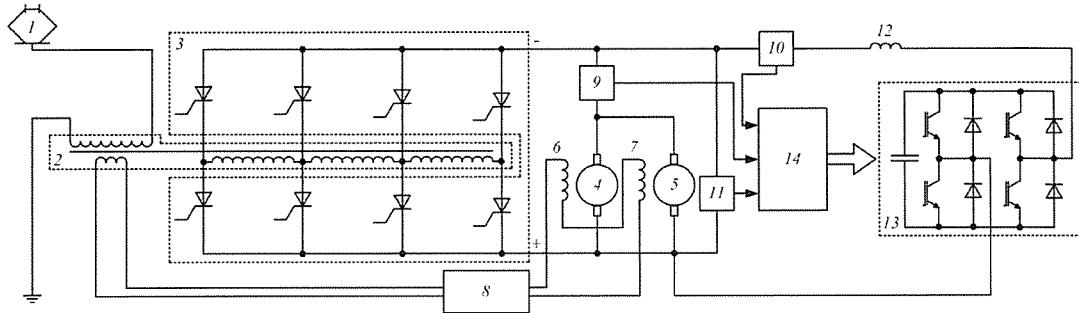


Рис. 1. Система для реалізації динамічних режимів тягового комплексу електровозу:

- 1 – пантограф; 2 – трансформатор напруги; 3 – тиристорний випрямно-інверторний перетворювач;
- 4 – якірні обмотки першого тягового двигуна; 5 – якірні обмотки другого тягового двигуна;
- 6 – обмотка збудження першого тягового двигуна; 7 – обмотка збудження другого тягового двигуна;
- 8 – випрямна установка збудження; 9 – датчик струму тягових двигунів; 10 – датчик струму конденсаторного накопичувача енергії; 11 – датчик напруги двигунів; 12 – реактор;
- 13 – конденсаторний накопичувач енергії; 14 – блок керування конденсаторним накопичувачем енергії

При цьому сигнал управління конденсаторним накопичувачем енергії формується виходячи з помилки:

$$\Delta i_{ces} = i_{ces}^{ref} - i_{ces} \quad (1)$$

де i_{ces}^{ref} – задане значення струму конденсаторного накопичувача енергії;
 i_{ces} – поточне значення струму конденсаторного накопичувача енергії.

Відповідно до цього напруга конденсаторного накопичувача енергії u_{ces} становить:

$$u_{ces} = \begin{cases} 1, & \text{при } \left(\Delta i_{ces} > HB, \frac{di_{ces}}{dt} > 0 \right) \cap \left(\Delta i_{ces} > -HB, \frac{di_{ces}}{dt} < 0 \right); \\ -1, & \text{при } \left(\Delta i_{ces} < -HB, \frac{di_{ces}}{dt} > 0 \right) \cap \left(\Delta i_{ces} > HB, \frac{di_{ces}}{dt} > 0 \right). \end{cases} \quad (2)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таким чином, забезпечуючи перемикання силових ключів конденсаторного накопичувача енергії, коли похибка перевищує фіксовану величину – зону гістерезису ($HB = 0,05i_{ces}^{ref}$). При цьому позитивні значення відповідають гальмуванню, а негативні – розгону. Критичне зниження напруги конденсатора може бути компенсовано його підзарядом від тиристорного перетворювача у статичному режимі.

На базі схеми рис. 1 в програмному пакеті Matlab розроблена математична модель тягового електротехнічного комплексу однієї секції електровозу для дослідження енергетичних процесів в статичному та динамічному режимах (рис. 2).

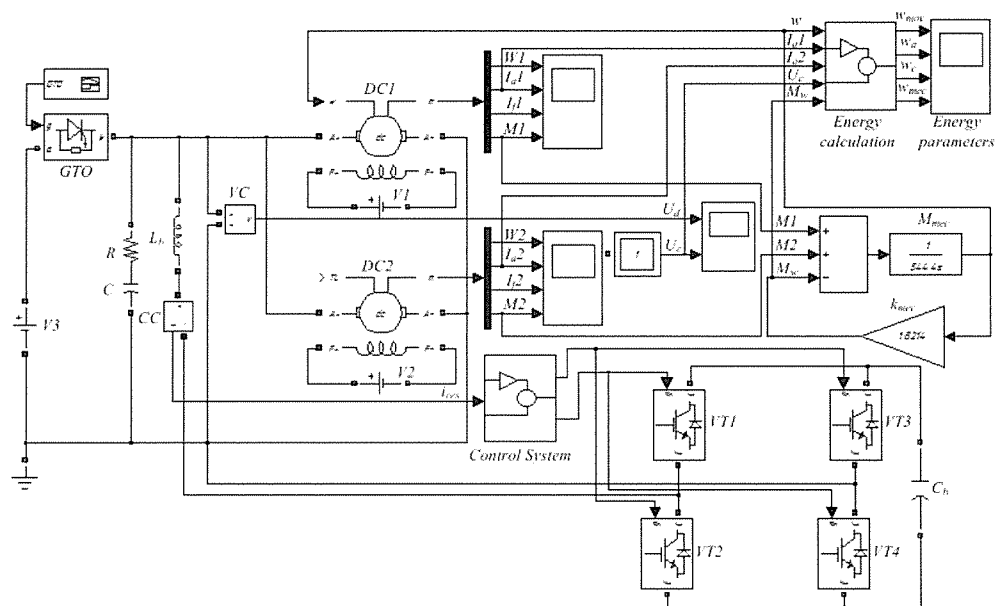


Рис. 2. Математична модель тягового електротехнічного комплексу однієї секції електровозу

Реальні тягові електродвигуни постійного струму НБ-418К6 потужністю 790 кВт з частотою обертів 890 об/хв та напругою 950 В у математичній моделі представлені блоками DC Machine. Порти моделей A+ і A- являються виводами обмотки якоря машин, а порти F+ та F- представляють собою виводи обмотки збудження. Порти TL призначені для подачі моменту опору руху. На вихідних портах m формуються векторні сигнали, що відображають вихідні параметри двигунів: частоту обертання, струм якоря, струм збудження та електромагнітний момент машин [11]. Якірні обмотки електричних машин (DC1, DC2) з'єднані паралельно, напруга якоря контролюється блоком VC. Обмотки збудження підключені до індивідуальних джерел постійної напруги (V1, V2). Живлення якірних кіл здійснюється блоком V3 через тиристор (GTO). Додатково для зниження високочастотних пульсацій введено пасивний фільтр RC.

Керований накопичувач, до складу якого входять транзистори VT1-VT4, конденсатор C_b , та індуктивність L_b , паралельно з'єднаний з якірними колами елек-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

тричних машин. Керування транзисторами здійснюється блоком Control System (рис. 3) з урахуванням поточного струму i_{ces} , який вимірюється блоком СС.

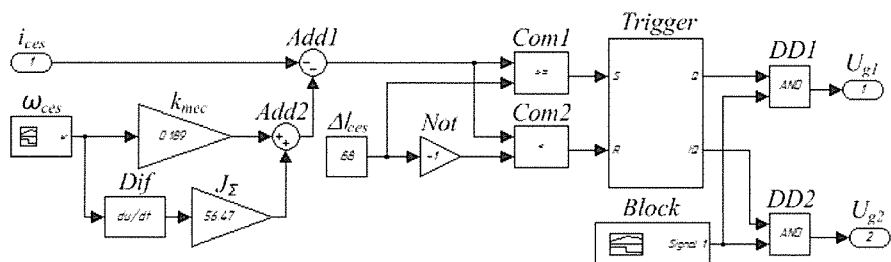


Рис. 3. Структура системи імпульсного керування Control system

У блоці Control System задається певна траєкторія зміни швидкості. На підставі того, з урахуванням коефіцієнту опору k_{mec} та приведеного моменту інерції J_{Σ} , визначається заданий струм:

$$i_{ces}^{ref} = \left[J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + k_{mec}\omega \right] \frac{1}{k\Phi}, \quad (3)$$

де k_{mec} – коефіцієнт механічного опору двигунів; J_{Σ} – приведений момент інерції двигунів; $k\Phi$ – магнітний потік двигунів.

За отриманим значенням струму i_{ces}^{ref} та поточним i_{ces} відповідно до виразів (1) та (2) формуються напруги керування транзисторами U_{g1} та U_{g2} , які за необхідності блокуються завдяки логічним елементам $DD1$ та $DD2$ за командою елемента $Block$.

Додатково в модель введено блок розрахунку енергетичних параметрів Energy calculation (рис. 4):

- енергія рухомих мас електровозу $W_{mov} = J\omega^2/2$;
- енергія конденсатора $W_c = CU^2/2$;
- втрати енергії якоря $W_a = I^2R$;
- корисна механічна енергія $W_{mec} = \int M\omega dt$.

У ході моделювання покладено: всі вентиля – ідеальні ключі з однобічною провідністю; пульсації випрямляча та його вихідного струму порівняно малі із постійною складовою; напруга, струм та частота обертання якоря пов'язані виразами відповідно рекомендацій [12]:

$$\begin{cases} u_a = L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + \omega_a k\Phi; \\ i_a = \frac{1}{k\Phi} \left(J \frac{d\omega_a}{dt} + k_m \omega_a \right), \end{cases} \quad (4)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

де U_a – напруга якоря; L_a – індуктивність якоря; i_a – струм якоря; R_a – активний опір якоря; ω_a – частота обертання якоря.

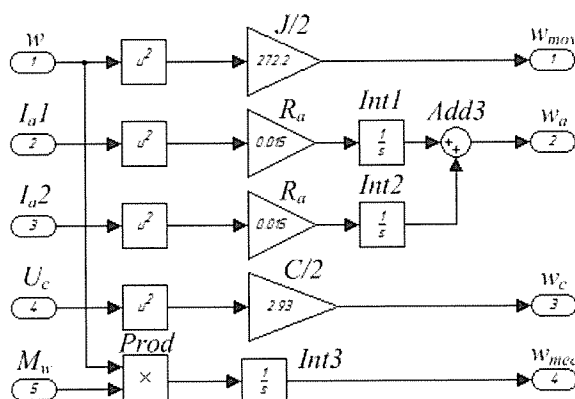


Рис. 4. Система для визначення енергетичних показників електровозу

У робочому режимі перетворювача VT1-VT4 $U_{g1} + U_{g2} = 1$, при цьому параметри режиму перетворювача пов'язані наступним чином:

$$\begin{cases} L \frac{di_{ces\ in}}{dt} = u_a - u_{ces\ in} = u_a - U_{g1} u_{c\ ces} \\ C \frac{du_{c\ ces}}{dt} = i_{c\ ces} = U_{g1} i_{ces\ in} \end{cases}$$

де $i_{ces\ in}$ – струм на вході конденсаторного накопичувача енергії; $u_{ces\ in}$ – напруга на вході конденсаторного накопичувача енергії; $u_{c\ ces}$ – напруга конденсаторного накопичувача; $i_{c\ ces}$ – струм конденсаторного накопичувача.

Виконано моделювання режиму зміни швидкості відповідно до рис. 5, а і отримано часові залежності струму та напруги якоря (рис. 5, б, в), а також зміна енергій (рис. 6). При цьому встановлені наступні параметри елементів конденсаторного накопичувача енергії: $L_b = L_a = 0,2$ мГн; $U_{cb} = 2,2U_a = 1995$ В; $C_b = 0,225$ Ф.

Для визначення впливу параметрів схеми конденсаторного накопичувача енергії на ефективність режиму досліджено енергетичні показники при зміні ΔI_{ces} , L_b та C_b . Було проведено наступні групи експериментів:

1. $\Delta I_{ces} = const = 0,88$ А, $L_b = 0,04 \dots 1$ мГн, $C_b = 0,225 \dots 1,125$ Ф.
2. $\Delta I_{ces} = 0,08 \dots 8,8$ А, $L_b = const = 0,2$ мГн, $C_b = 0,225 \dots 1,125$ Ф.
3. $\Delta I_{ces} = 0,08 \dots 8,8$ А, $L_b = 0,04 \dots 1$ мГн, $C_b = const = 0,225$ Ф.

За результатами експериментів були побудовані графіки залежностей (рис. 7–9), де позначено W_{cr} , W_{cg} – енергія конденсатора в режимі розгону та гальмування, відповідно; W_{movr} , W_{movg} – енергія рухомих мас електровозу в режимі розгону та гальмування, відповідно.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

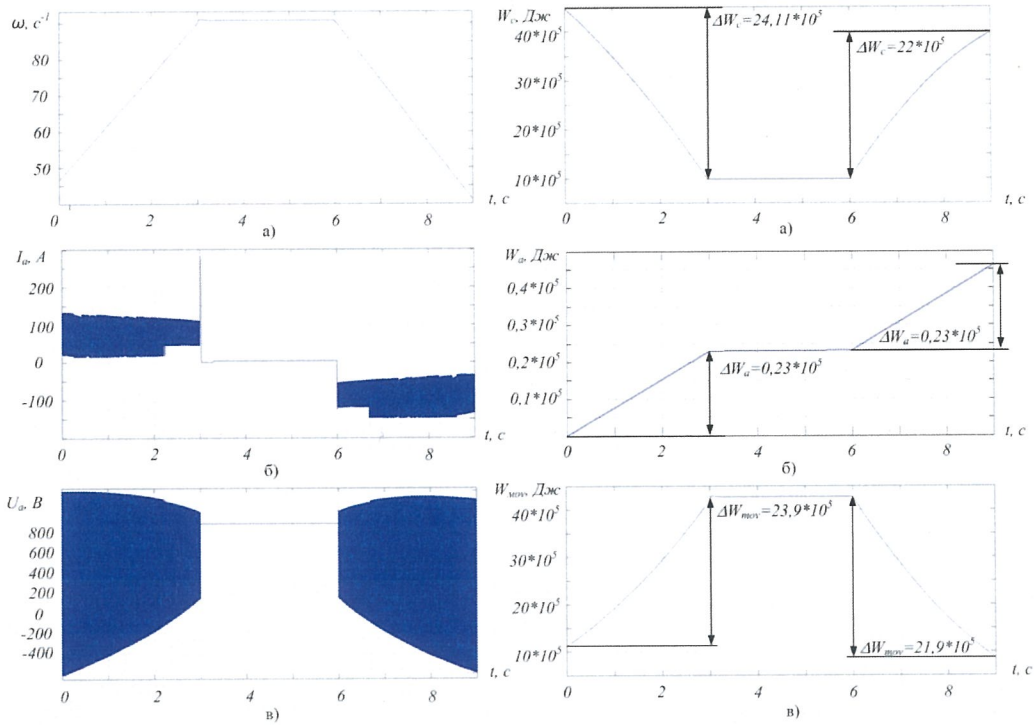


Рис. 5. Графіки перехідних процесів двигунів:
 а – частоти обертання; б – струму;
 в – напруги

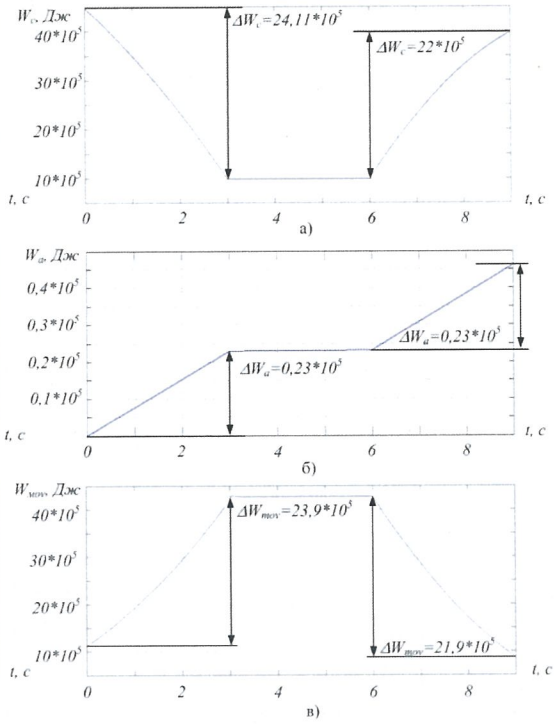


Рис. 6. Енергетичні показники роботи системи:
 а – енергія конденсатора; б – втрати якоря
 в – кінетична механічна енергія

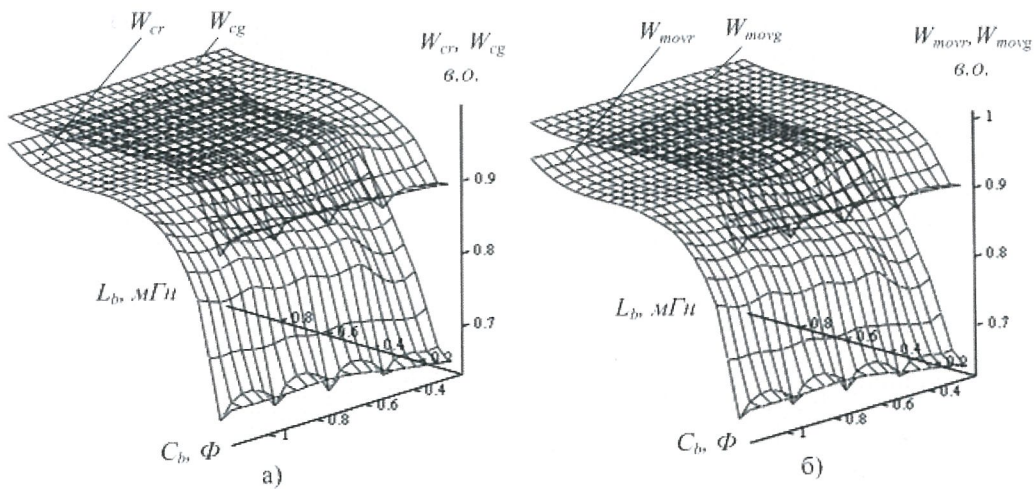


Рис. 7. Енергетичні показники роботи двигунів конденсатора в режимі розгону та гальмування:
 а – енергія при $\Delta I_{ces} = const$; б – накопичена енергія рухомих мас електровозу в режимі при $\Delta I_{ces} = const$

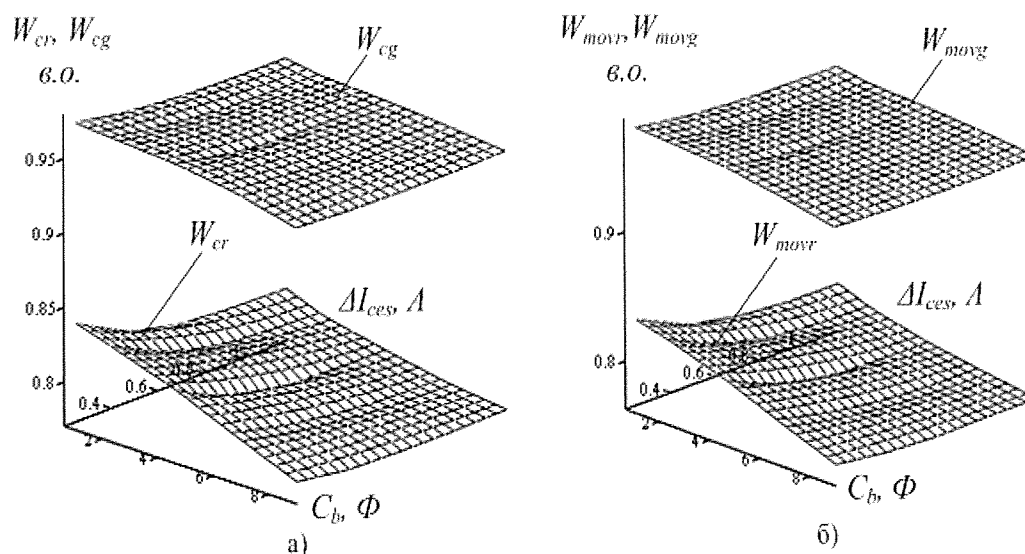


Рис. 8. Енергетичні показники роботи двигунів конденсатора в режимі розгону та гальмування:

а – енергія конденсатора при $L_b = const$; б – накопичена енергія рухомих мас електровозу при $L_b = const$

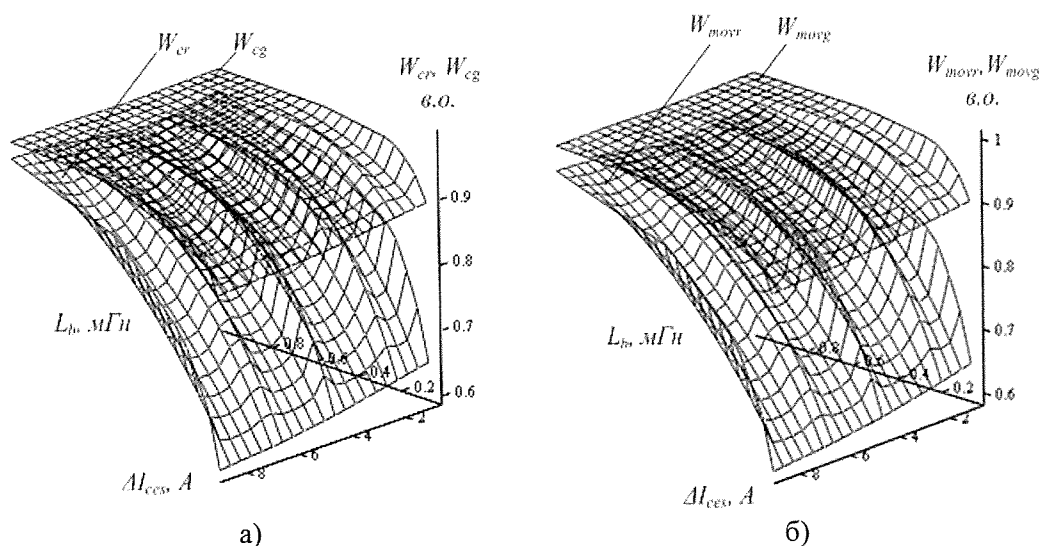


Рис. 9. Енергетичні показники роботи двигунів конденсатора в режимі розгону та гальмування:

а – енергія конденсатора при $C_b = const$; б – накопичена енергія рухомих мас електровозу при $C_b = const$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Висновки.

1. Розроблено модель для дослідження енергетичних процесів в системі керований конденсаторний накопичувач – двигун постійного струму, яка дозволяє реалізувати режими розгону, сталого руху та гальмування електровоза.

2. У результаті ланки експериментів з варіацією параметрів системи, досліджено енергетичні показники при зміні значень буферної індуктивності, ємності конденсатора та амплітуди пульсацій струму, за отриманими графічними залежностями встановлено:

– втрати якоря сильно залежать від буферної індуктивності L_b , а саме, зменшуються з її ростом, при $L_b > 3L_a$ суттєва зміна енергії втрат не спостерігається, тобто достатньо вибрати буферну індуктивність величиною, $L_b \approx 3L_a$;

– в розглянутому діапазоні параметрів залежність накопиченої (механічної)/відданої (електричної) енергій від буферної індуктивності L_b складає 10...25%, в той час як зміна ємності в 5 разів від розрахункової дає приріст енергії 2...4%, що свідчить про недоцільність збільшення ємності відносно розрахункової;

– суттєва зміна амплітуди пульсацій струму ΔI_{ces} та ємності конденсаторного накопичувача енергії C викликає незначну зміну енергетичних показників на 1...3%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Феоктистов В.П., Просвиров Ю.Е. Электрические железные дороги: учебник. Москва: Моск. ун-т путей сообщения, 2006. 312 с.
2. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учебник для вузов ж.д. трансп. Москва: Транспорт, 1982. 528 с.
3. Кабальк Ю.С. Системы управления электроподвижным составом: учеб. пособ. Хабаровск: ДВГУПС, 2013. 119 с.
4. Грищенко А.В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава: учебник. Москва: «Академия», 2005. 320 с.
5. Бут Д.А. Накопители энергии: учеб. пособие для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 397 с.
6. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж-д трансп. Москва: Транспорт, 1999. 464 с.
7. Слепцов М.А. Основы электрического транспорта: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. Москва: «Академия», 2006. 464 с.
8. Тушканов Б.А. Электровоз ВЛ80р. Руководство по эксплуатации. Москва: Транспорт, 1985. 541 с.
9. Колб А.А. Теория электроприводу: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. 511 с.
10. Бялобржеський О.В. Схема гальмування двигуна постійного струму з конденсаторним накопичувачем. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ імені Михайла Остроградського, 2013. Вип. 2 (22). С. 366–370.
11. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Москва: ДМК; Санкт-Петербург: Питер, 2008. 496 с.
12. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учеб. пособ. Москва: Юрайт, 2012. 667 с.

O.V. Bialobrzheskyi

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20 Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine
tel.: +380 96 2525717, E-mail: seemal@kdu.edu.ua
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1669-4580>

A.I. Gladyr

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20 Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine
tel.: +380 50 9008110, E-mail: andrii.gladyr@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3521-9112>

V.Yu. Nozhenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20 Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine
tel.: +380 66 1797254, E-mail: nozhenkovika@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0126-6970>

**ENERGY PROCESSES IN THE "CONTROLLED CAPACITOR
ACCUMULATOR - DC MOTOR" SYSTEM**

VL-80 locomotives with a 25 kV AC traction power supply system are mostly operated on the railway. The electric drive of most types of such locomotives provides regenerative braking. In order to reduce the flow of energy through the traction transformer and catenary, technical solutions for devices with energy storage systems have been developed. The work is devoted to the synthesis of the model of the system "controlled capacitor storage - DC motor" of the traction complex of the electric locomotive for energy processes studying. A scheme of the system for the implementation of dynamic modes of the traction complex of the electric locomotive, which allows the accumulation of excess energy generated by the motor during braking on the capacitor drive, and its further use during acceleration, was proposed. The scheme of the system of accumulation of electric energy on the capacitor provides the formation of the necessary accelerate/braking current. To do this, a unit that according to the desired trajectory of the velocity changes determines the corresponding dynamic torque and implements the formation of dynamic current is added to the system. A mathematical Matlab model of traction electrical complex with DC motor NB-418K6 for the study of energy processes in static and dynamic modes was developed. Given the high mechanical inertia of the railway train, in order to reduce the simulation time, the equivalent moment of inertia was determined. The model allows you to implement modes of acceleration, steady motion, electric locomotive braking and calculate energy parameters: energy of moving masses of electric locomotive, capacitor energy, armature energy loss, and useful mechanical energy. As a result of previous experiments, time diagrams that reflect the change in the electrical parameters of the engine and the energy parameters of the respective circuits were obtained.

With the help of the developed mathematical model, a number of experiments with the variation of system parameters were carried out, and energy indicators at the

change of values of buffer inductance, capacitor capacity, and amplitude current pulsations were investigated. As a result of the analysis of the conducted investigation, it is established that the armature losses strongly depend on the value of the buffer inductance. A significant change in the amplitude of current pulsations and capacitance of the capacitor energy storage causes a slight change in energy performance.

Key words: energy indicators, controlled capacitor storage, DC motor, electric locomotive traction complex.

REFERENCES

1. Feoktistov V. and Prosvirov Yu. (2006). *Elektricheskiye zheleznyye dorogi: uchebnik. [Electric Railways]*. Moscow: Mosc. un-t putey soobshcheniya, p. 312. [in Russian]
2. Markvardt K. (1982). *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog: uchebnik dlya vuzov zh d. transp [Power supply of electrified railways: a textbook for universities railway transp]*. Moscow: Transport, p. 528. [in Russian]
3. Kabalyk Yu. (2013). *Sistemy upravleniya elektropodvizhnym sostavom: ucheb. posob. [Control systems for electric rolling stock]*. Khabarovsk: DVGUPS, p. 119. [in Russian]
4. Grishchenko A. (2005). *Elektricheskiye mashiny i preobrazovateli podvizhnogo sostava: uchebnik [Electric machines and rolling stock converters]*. Moscow: «Akademiya», p. 320. [in Russian]
5. But D. (1991). *Nakopiteli energii: ucheb. posobiye dlya vuzov [Energy storage]*. Moscow: Energoatomizdat, p. 397. [in Russian]
6. Burkov A. (1999). *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli: ucheb. dlya vuzov zh-d transp. [Electronic technology and converters]*. Moscow: Transport, p. 464. [in Russian]
7. Sleptsov M. (2006). *Osnovy elektricheskogo transporta: ucheb. dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy [Fundamentals of electric transport]*. Moscow: «Akademiya», p. 464. [in Russian]
8. Tushkanov B. (1985). *Elektrovoz VL80r. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL80r. Manual]*. Moscow: Transport, p. 541. [in Russian]
9. Kolb A. (2006). *Teoriya elektropryvodu: navchalnyy posibnyk [Theory of electric drive]*. Dnipropetrovsk: Natsionalnyy hirnychyy universytet, p. 511. [in Ukrainian]
10. Byalobrzheskyi O. (2013). “The braking scheme of a DC motor with a capacitor drive”. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*. Vol. 2. no. 22. pp. 366–370. [in Ukrainian]
11. Chernykh I. (2008). *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]*. Moscow: DMK; Sankt-Peterburg: Piter, p. 496. [in Russian]
12. Zinovyev G. (2012). *Silovaya elektronika: ucheb. posob. [Power electronics]*. Moscow: Yurayt, p. 667. [in Russian]