

УДК 621.314.12.

МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ КОНТАКТНА МЕРЕЖА ЗМІННОГО СТРУМУ–ТЯГОВИЙ КОМПЛЕКС МАГІСТРАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ**О. В. Бялобржеський, Т. Ю. Сухonos, Л. В. Курись**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: seemAl@kdu.edu.ua

Проведено аналіз необхідності оцінки енергетичних процесів у системі контактна мережа змінного струму–тяговий комплекс електровозу. На підставі аналізу питань електропостачання та специфіки перетворюючого агрегату синтезовано модель, в основу якої покладено тяговий електротехнічний комплекс візка секції електровозу ВЛ80р. У моделі реалізовано режими розгону та гальмування двигунів електровозу із зонним імпульсним регулюванням напруги секцій силового перетворювача у випрямних та інверторних режимах відповідно. Додатково в модель уведено підсистему контактної мережі зі змінними за шляхом електровоза параметрами активних та індуктивних опорів, що дозволяє дослідити якісні та кількісні показники режиму передачі електричної енергії по ланці: тягова підстанція, контактна мережа, візок електровоза. На підставі отриманих результатів дослідження встановлено необхідність використання фільтрокомпенсуючого пристрою для зниження коефіцієнта гармонік та підвищення загального коефіцієнта потужності.

Ключові слова: математична модель, електровоз, контактна мережа, показники режиму.**МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ КОНТАКТНАЯ СЕТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА–ТЯГОВЫЙ КОМПЛЕКС МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА****А. В. Бялобржеский, Т. Ю. Сухonos, Л. В. Курись**Кременчугский национальный университет имени Михайла Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: seemAl@kdu.edu.ua

Проведен анализ необходимости оценки энергетических процессов в системе контактная сеть переменного тока–тяговой комплекс электровоза. На основании анализа вопросов электроснабжения и специфики преобразовывающего агрегата синтезирована модель, в основу которой положен тяговой электротехнический комплекс тележки секции электровоза ВЛ80р. В модели реализованы режимы разгона и торможения двигателей электровоза с зонным импульсным регулированием напряжения секций силового преобразователя в выпрямительных и инверторных режимах соответственно. Дополнительно в модель введена подсистема контактной сети со сменными по пути электровоза параметрами активных и индуктивных сопротивлений, что позволяет исследовать качественные и количественные показатели режима передачи электрической энергии по цепи: тяговая подстанция, контактная сеть, тележка электровоза. На основании полученных результатов исследования установлена необходимость использования фильтрокомпенсирующего устройства для снижения коэффициента гармоник и повышения общего коэффициента мощности.

Ключевые слова: математическая модель, электровоз, контактная сеть, показатели режима.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Залізничний транспорт є однією з енергоємних галузей економіки України. Споживання електроенергії залізничним транспортом досягає 4,7 % від загального обсягу споживання електроенергії. Найбільше поширення на мережі залізниць отримали серійні магістральні електровози змінного струму ВЛ80 [1], які отримують живлення від системи електропостачання тяги змінного струму 27,5 кВ зі зворотнім (екрануючим) і посилюючим проводами, і відстанями між підстанціями 40–60 км [2].

Важливу групу електричних величин, які характеризують режим, складають показники напруги в тяговій мережі. Напруга на струмоприймачах електрорухомого транспорту змінюється в широких межах, що обумовлено як переміщенням транспортних одиниць, так і змінами споживаного ними струму. При використанні рекуперативного гальмування напруга на струмоприймачі рекуперуючого рушійного транспорту може перевищувати напругу холостого

ходу тягової підстанції [3]. При цьому електровози з напівпровідниковими системами є потужними генераторами вищих гармонік, що проявляються як у тяговій мережі, так і в системі зовнішнього електропостачання [3, 4].

Інша група електричних величин – втрати потужності в тяговій мережі. Цей чинник використовують в економічних оцінках систем електропостачання при виборі економічно найвигіднішого перетину дротів тягової мережі й оптимальних відстаней між тяговими підстанціями. При цьому середня втрата потужності в тяговій мережі визначається як середнє значення відносно всіх практично реалізованих в експлуатації графіків при розрахункових траєкторіях руху [3, 4].

Таким чином, існуючі методи розрахунку параметрів режиму системи контактна мережа змінного струму–тяговий комплекс електровозу є достатніми для проектних розрахунків та аналізу сталих режимів. Для динамічних режимів (прискорення та гальмування) вказані методи є складними та трудомісткими, а в результаті – не придатними для аналізу

миттєвих електричних та енергетичних параметрів режиму.

Метою роботи є розробка моделі системи контактної мережі змінного струму–тяговий комплекс магістрального електровозу для дослідження розподілу електричної енергії.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Під час розрахунку систем електропостачання залізничного електротранспорту розглядають схему за структурою, яка включає: навантаження (електровоз або декілька електровозів (EL)), контактну мережу (CN), тягову чи тягові підстанції (TS) (рис. 1) та районну мережу 110/220 кВ (PS).

Зважаючи на те, що серед транспортних одиниць серії ВЛ80 електровоз ВЛ80р має режим рекуперації та, відповідно, є найбільш складним електроспоживачем серії, саме його прийнято як навантаження. Тягова частина секції електровоза складається з однофазного тягового трансформатора (T) типу ОДЦЕ–5000/25АМ: $S = 4777$ кВА; $U_M = 25$ кВ; $\eta = 98,3$ %; $U_{Tax} = 1230$ В; випрямно-інверторного перетворювача (TC) ВІП2–2200М на тиристорах Т2–320–15; тягових двигунів ($DCM1-4$) типу НБ–418К6: $P = 790$ кВт; $U = 950$ В; $I = 880$ А; $n = 890$ об/хв; $\eta = 94,5$ %.

Припустимо, що контактна мережа (CN), виконана дротом МФ–100 з погонними параметрами $R_0 = 0,0177$ Ом/км; $X_0 = 0,0141$ Ом/км, має одностороннє живлення від трансформатора (TS) типу ТДНЖ 40000/110: $S = 40000$ кВА; $U_{HV} = 115$ кВ; $U_{AV} = 38,5$ кВ; $U_{LV} = 27,5$ кВ; $U_{SCHA} = 17$ %; $U_{SCHL} = 10,5$ %; $U_{SCAH} = 6$ %. Районна мережа, що живить тягову підстанцію, є ідеальним джерелом живлення (PS).

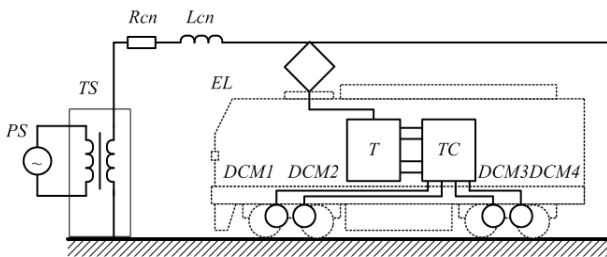


Рисунок 1 – Узагальнена структура системи контактної мережі змінного струму–тяговий комплекс магістрального електровозу (секція ВЛ80р)

Задача дослідження процесу розподілу електричної енергії в моделі вирішується шляхом розрахунку зміни в часі наступних параметрів:

- струму електровоза, контактної мережі ($i_{EL} = i_{CN}$);
- коефіцієнта спотворення струму ($THD_{I,CN}$);
- падіння напруги в контактній мережі (Δu_{CN});
- напруги електровоза (u_{EL});

- коефіцієнта спотворення напруги ($THD_{U,EL}$);
- активної та реактивної потужностей тягового комплексу електровоза (P_{EL}, Q_{EL});
- втрат активної та реактивної потужності в контактній мережі ($\Delta P_{CN}, \Delta Q_{CN}$);
- коефіцієнта потужності системи мережа–тяговий комплекс електровозу за основною гармонікою ($\cos \varphi_{EL}$);
- повного коефіцієнта потужності тягового комплексу (χ_{EL}).

Двигуни постійного струму, які входять до складу тягового комплексу одного візка секції електровозу ВЛ80р, нехтуючи буксуванням та пружними зв'язками, механічно з'єднані між собою ($\omega_1 = \omega_2 = \omega$) через рейку, а також попарно з'єднані електрично $u_1 = u_2 = u_{TC}$, відповідно до [7, 9]:

$$\begin{cases} L_{\Sigma 1} \frac{di_1}{dt} = u_{TC} - k\Phi_1 \omega - i_1 R_{\Sigma 1}; \\ k\Phi_1 = k_{FW} i_1; \\ L_{\Sigma 2} \frac{di_2}{dt} = u_{TC} - k\Phi_2 \omega - i_2 R_{\Sigma 2}; \\ k\Phi_2 = k_{FW} i_2; \\ J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = k\Phi_1 i_1 + k\Phi_2 i_2 - k_m \omega; \\ i_1 + i_2 = i_{TC}, \end{cases} \quad (1)$$

де $R_{\Sigma 1}, R_{\Sigma 2}$ і $L_{\Sigma 1}, L_{\Sigma 2}$ – активний опір та індуктивність машин, враховуючи послідовне з'єднання обмоток якоря та збудження; i_1, i_2 – струми машин; u – напруга на виході ВІП; $k\Phi_1, k\Phi_2$ – коефіцієнти потоку машин; J_{Σ} – приведений момент інерції; k_m – коефіцієнт опору руху; k_{FW} – коефіцієнт передачі обмотки збудження. Модель, що відповідає системі рівнянь (1), зображена на рис. 2, зібрана в середі візуального програмування Simulink Matlab.

Тягові двигуни електровоза працюють на випрямленому пульсуючому струмі. Перетворення однофазного струму контактної мережі у випрямлений здійснюється за допомогою тягового трансформатора Тр та ВІП, установлених у кожній секції. ВІП зібраний на керованих вентилях (тиристорах) і має сім плечей, що утворюють мостову схему. Всі плечі ВІП мають по сім паралельних гілок з трьома послідовно з'єднаними вентилями (за винятком п'ятого й шостого плеча в кожній гілці, в яких по два послідовно з'єднаних вентиля). Плавне регулювання напруги тягових двигунів досягається управлінням тиристорами відповідних плечей двох перетворювачів. Результуюча напруга на двигуни визначається числом робочих груп і кутом відкриття тиристорів.

Для моделювання трансформатора та ВІП (рис. 3) використано елементи бібліотеки SimPower System Simulink Matlab. З урахуванням різного типу сигналів, які використовуються в системі Simulink та SimPower System, уведені блок VS_{TS} та програмоване

джерело струму (*PCS*). Модель, зображену на рис. 2, введено як підсистему (*DCM1-2*) (рис. 3) з портами напруги перетворювача u_{TC} , струму перетворювача i_{TC} та частотою обертання ω електричних машин.

Кожен із блоків *TC* (рис. 3) має одне плече, анодні та катодні виводи блоків з'єднані паралельно, а середні точки підключені до відповідних виводів тягового трансформатора (*T*), керуючі виводи підключено до відповідних виходів системи імпульсно-фазового управління (*PPSC*), яка по входу u_s через датчик напруги (VS_{EL}) синхронізована з мережею. Параметри трансформатора *T* та *TC* розраховані на підставі номінальних даних за відомою методикою [7]. Напруга в точці під'єднання пантографа електровозу до контактного проводу задається через ви-

води i_{CNF} , i_{CNN} . Опір місця приєднання пантографа до контактного проводу покладено нульовим.

Систему імпульсно-фазового управління (*PPSC*) (рис. 4) побудовано за вертикальним принципом управління, з урахуванням специфіки зонного регулювання груп перетворювача електровоза ВЛ80р [3]. Для реалізації зонного регулювання окрім традиційних блоків: задатчика напруги управління (*VRef*), детектора початкової фази напруги мережі (*Detect*), генератора пилкоподібної напруги, реалізованого на інтеграторі із зовнішнім скиданням (*RIntegr*), компаратора (*Comp*) та формувача тривалості імпульсу управління (*PSh*) – введено блок задання зони регулювання напруги – задатчик групи тиристорів.

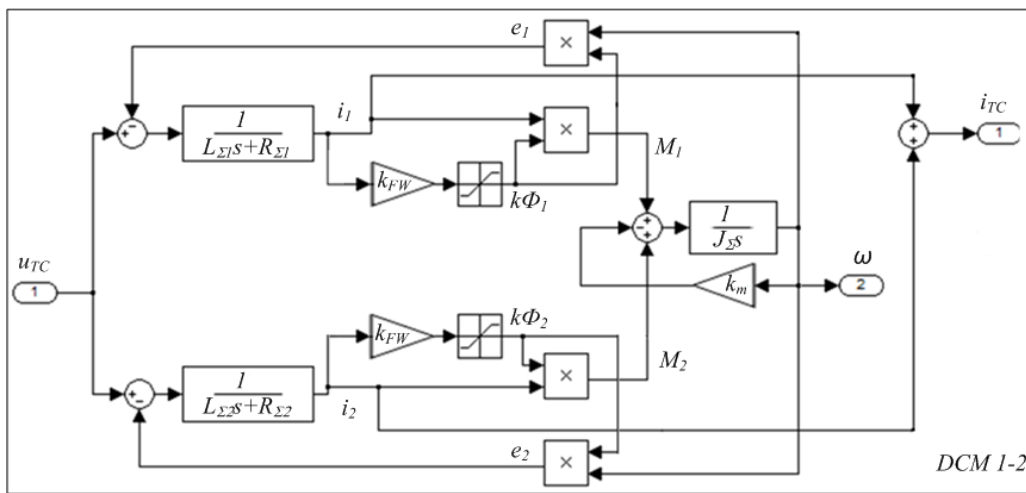


Рисунок 2 – Модель дводвигунного приводу

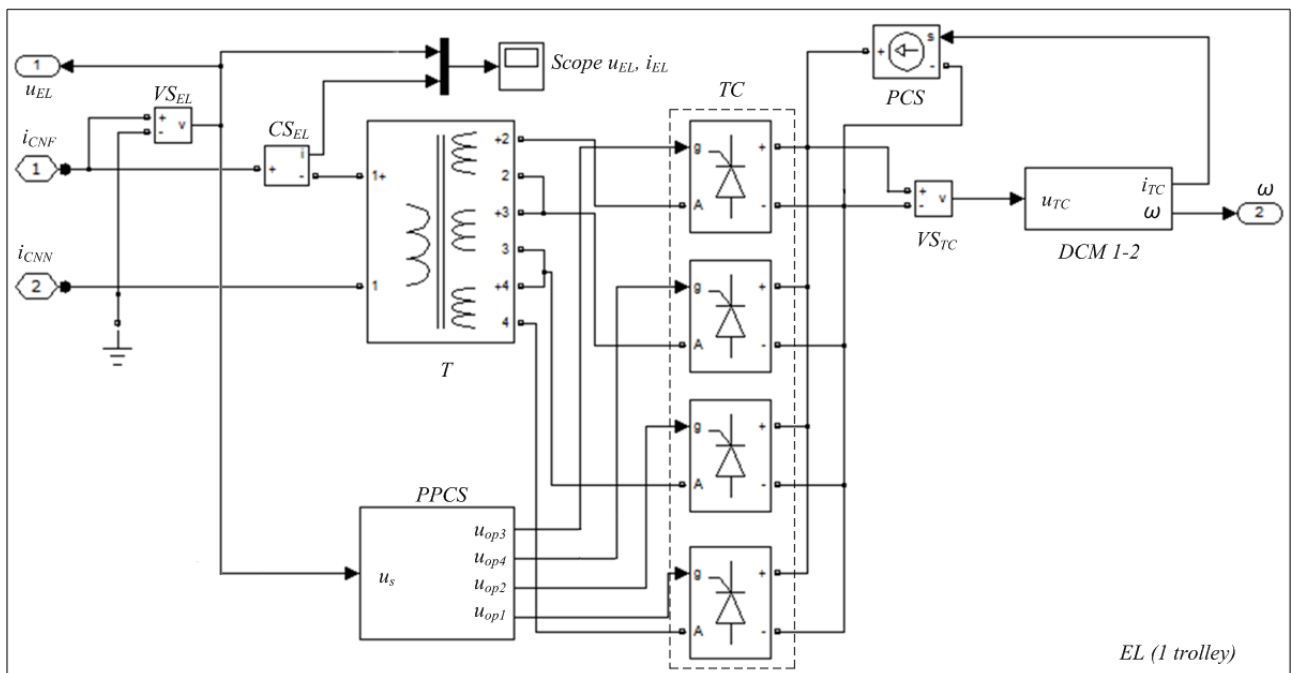


Рисунок 3 – Підсистема тягового комплексу одного візка секції електровоза ВЛ80р

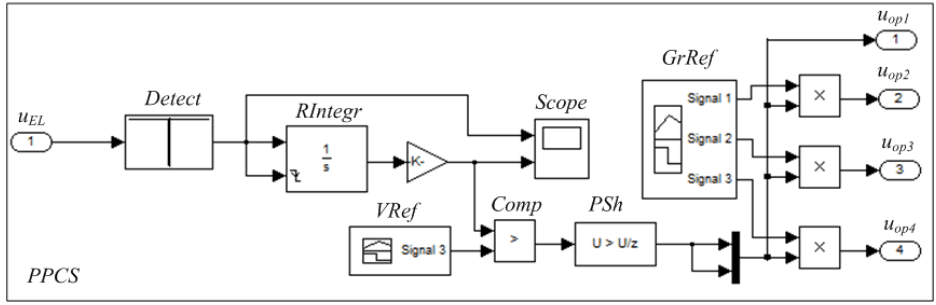


Рисунок 4 – Підсистема СІФУ

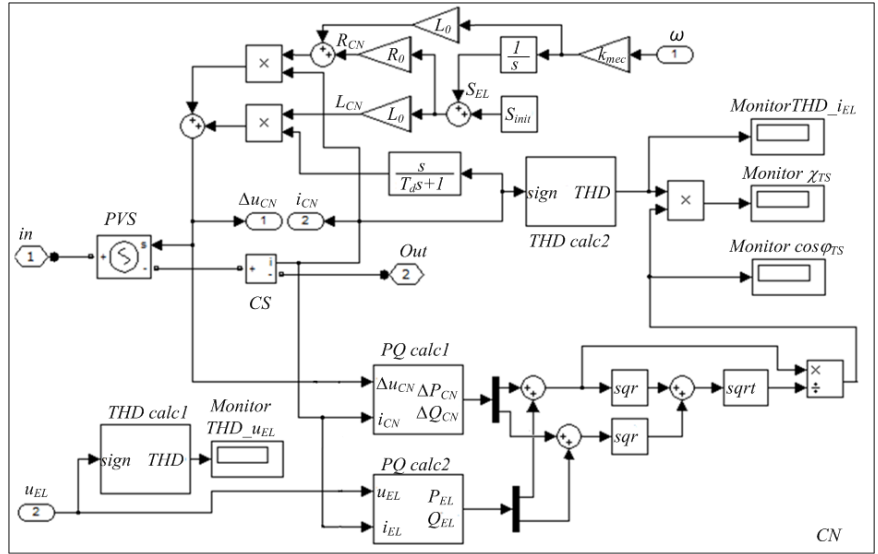


Рисунок 5 – Підсистема контактної мережі з елементами вимірювання

Для оцінки режиму контактної мережі та впливу режиму електроспоживання тягового комплексу на неї в модель уведено підсистему контактної мережі (CN) (рис. 5).

Зважаючи на зміну за шляхом параметрів контактної мережі, в модель додатково введені блоки та зв'язки, що реалізують визначення поточного значення шляху (s_{EL}), який пройшов електровоз, відповідно до рівняння

$$s_{EL} = s_{init} + \int k_{mec} \omega dt = s_{init} + \int \frac{v_r}{\omega_r} \omega dt, \quad (2)$$

де k_{mec} – коефіцієнт передачі механічної частини; v_r , ω_r – номінальні лінійна швидкість електровозу та кутова частота двигуна відповідно; s_{init} – початкова відстань від тягової підстанції.

Контактна мережа надається схемою заміщення з двох послідовних елементів – активного опору та індуктивності [6], напруга та струм в яких пов'язані рівнянням

$$u_{EL} = u_{TS} - \Delta u_{CN} = u_{EL} - \frac{d}{dt} [L_{CN} i_{EL}] - R_{CN} i_{EL}, \quad (3)$$

де u_{EL} – напруга, що надходить до електровоза; u_{TS} – напруга тягової підстанції; Δu_{CN} – падіння напруги в контактній мережі; i_{EL} – струм електро-

воза; L_{CN} , R_{CN} – індуктивність та активний опір контактної мережі:

$$R_{CN} = R_0 s_{EL}; \quad L_{CN} = L_0 s_{EL}, \quad (4)$$

де L_0, R_0 – погонні значення індуктивності та опору відповідно. Враховуючи зміну місця підключення електровоза до контактної мережі відповідно до (2), Δu_{CN} матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta u_{CN} &= \frac{d}{dt} [L_0 s_{EL} i_{EL}] + R_0 s_{EL} i_{EL} = \\ &= L_0 k_{mec} \omega i_{EL} + L_0 s_{EL} \frac{di_{EL}}{dt} + R_0 s_{EL} i_{EL}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким чином, у моделі враховано, що втрати напруги в контактній мережі залежать не тільки від поточного положення електровозу, а й від швидкості його руху (перша складова рівняння).

Для оцінки викривлення струму та напруги введено блоки (*THD calc1*, *THD calc2*):

$$THD_{I,CN} = \frac{\sqrt{I_{CN,d}^2 - I_{CN(0)}^2 - I_{CN(1)}^2}}{I_{CN(1)}}, \quad (6)$$

$$THD_{U,EL} = \frac{\sqrt{U_{EL,d}^2 - U_{EL(0)}^2 - U_{EL(1)}^2}}{U_{EL(1)}}, \quad (7)$$

де $I_{CN,d}$, $I_{CN(0)}$ – діюче та середнє значення струму контактної мережі; $I_{CN(1)}$ – діюче значення першої гармоніки струму контактної мережі; $U_{EL,d}$, $U_{EL(0)}$ – діюче та середнє значення напруги електровоза; $U_{EL(1)}$ – діюче значення першої гармоніки напруги електровоза.

Активну та реактивну потужності електровоза й відповідні втрати в контактній мережі визначаються блоками ($PQcalc1$, $PQcalc2$):

$$\begin{aligned} P_{EL} &= I_{EL(1)} U_{EL(1)} \cos \varphi_{(1)}; \\ Q_{EL} &= I_{EL(1)} U_{EL(1)} \sin \varphi_{(1)}; \\ \Delta P_{CN} &= I_{CN(1)} \Delta U_{CN(1)} \cos \phi_{(1)}; \\ \Delta Q_{CN} &= I_{CN(1)} \Delta U_{CN(1)} \sin \phi_{(1)}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $\Delta U_{CN(1)}$ – діюче значення першої гармоніки падіння напруги в контактній мережі; φ_1 – різниця фаз між першими гармоніками напруги u_{EL} та струму i_{EL} ; ϕ_1 – різниця фаз між першими гармоніками напруги Δu_{CN} та струму i_{CN} .

У результаті для дослідження доступні коефіцієнт потужності за першою гармонікою та повний коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi_{TS} = \frac{P_{EL} + \Delta P_{CN}}{\sqrt{(P_{EL} + \Delta P_{CN})^2 + (Q_{EL} + \Delta Q_{CN})^2}}; \quad (9)$$

$$\chi_{TS} = \cos \varphi_{TS} THD_{I_{CN}}. \quad (10)$$

Узагальнена схема моделі наведена на рис. 6. Проведено ланку експериментів для дослідження електроенергетичних режимів роботи контактної мережі змінного струму – тягового комплексу візка секції електровозу за прийнятих умов, зокрема режими розгону та гальмування.

Прийнято, що електровоз знаходиться на початковій відстані $s_{init} = 25$ км, для зниження машинного часу розрахунку, зважаючи на незначний вплив на характер досліджуваних процесів, приведений момент інерції знижено до рівня $J_{\Sigma} = 10J_{DM}$.

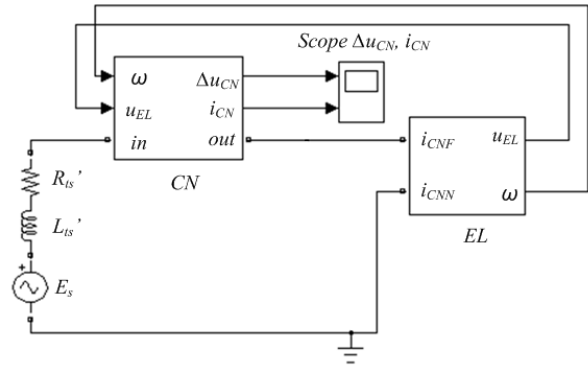


Рисунок 6 – Схема системи контактна мережа змінного струму–тяговий комплекс магістрального електровозу

Зміну в часі електричних та енергетичних параметрів наведено на рис. 7, 8.

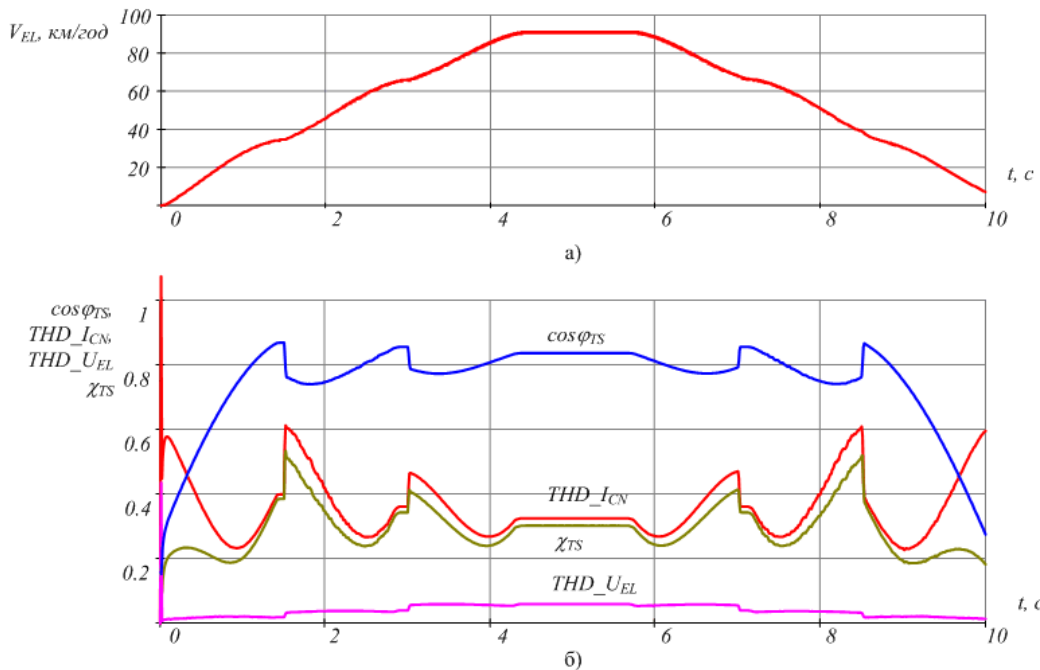


Рисунок 7 – Зміна в часі енергетичних параметрів режиму:

- а) швидкість електровоза; б) коефіцієнт потужності за першою гармонікою, загальний коефіцієнт потужності тягової підстанції, коефіцієнт гармонік струму та напруги контактної мережі

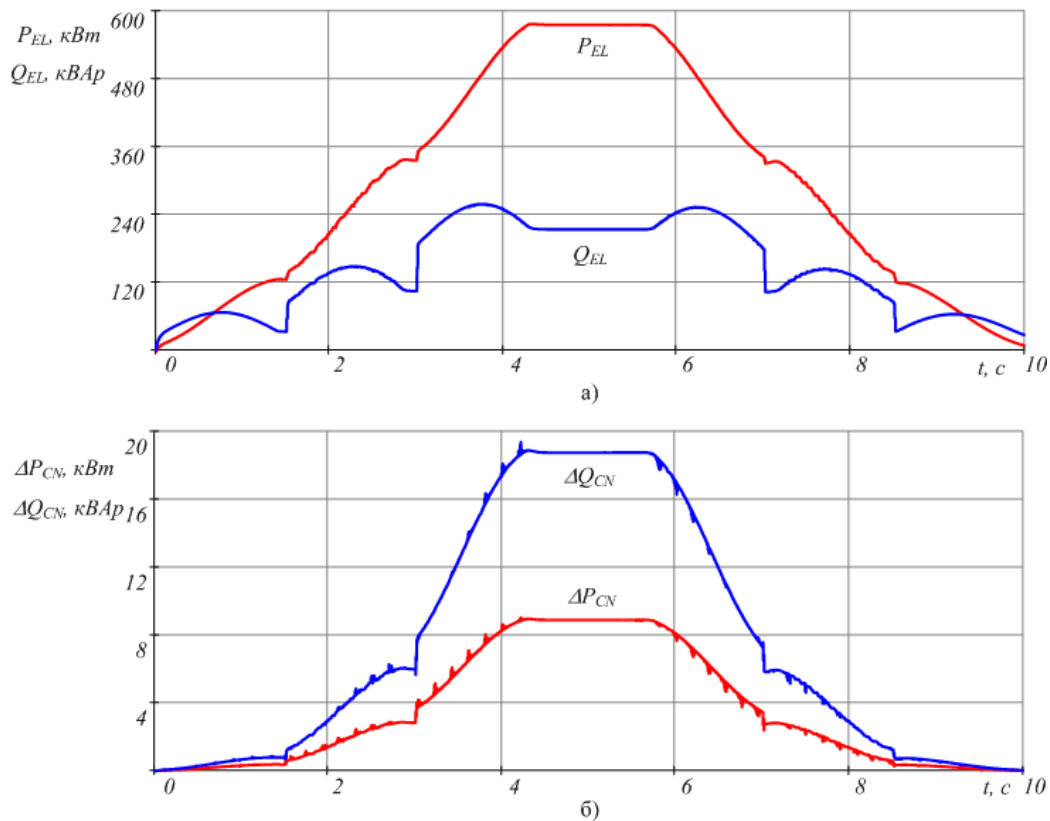


Рисунок 8 – Зміна в часі енергетичних параметрів режиму:

а) активна та реактивна (за першою гармонікою струму) потужності електровоза; б) активна та реактивна (за першою гармонікою струму) потужності втрат у контактній мережі

ВИСНОВКИ. 1. Розроблено модель для дослідження розподілу електричної енергії в системі контактна мережа змінного струму–тяговий комплекс магістрального електровозу, яка дозволяє реалізувати режими розгону, сталого руху та гальмування електровоза.

2. Введено в модель блоку випрямно-інверторного перетворювача із системою управління, а також блоків та зв'язків для визначення енергетичних параметрів електроспоживання комплексу в часі.

3. У результаті дослідження режимів розгону та гальмування встановлено, що втрати активної та реактивної потужностей переважно формуються за рахунок споживаної активної потужності, а графік зміни реактивної потужності має коливання, викликані зміною кута управління та групи вентилів перетворювача.

4. Коефіцієнт потужності за першою гармонікою під час руху на високих швидкостях змінюється в діапазоні 0,8–0,85, на відміну від діапазону швидкостей 0–30 км/год (швидкості маневрування), де приймає значення 0,35–0,8.

5. Несинусоїдальність струму та втрати напруги в мережі призводять до зниження загального коефіцієнта потужності до рівня 0,25–0,6.

6. Зважаючи на коефіцієнт потужності за першою гармонікою та повний коефіцієнт потужності, компенсація реактивної потужності недостатня для підвищення енергетичних показників.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пушканова П.А. Электровоз ВЛ80р. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1985. – 541 с.
2. Слепцова М.А. Основы электрического транспорта. – М.: Академия, 2006. – 464 с.
3. Грищенко А.В., Стрекопытов В.В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава. – М.: Академия, 2005. – 320 с.
4. Маквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
5. Калинина В.К. Электровозы и электропоезда. – М.: Транспорт, 1991. – 480 с.
6. Зак В.В., Зарифьян А.А., Колпахчян П.Г. Улучшение энергетических показателей электровазов переменного тока с зонно-фазным регулированием напряжения // Вестник СХУ им. В. Даля. – Луганск, 2011. – Вып. 4/2011 (158). – С. 185–190.
7. Микитенко А.Г., Плохов Э.М., Зарифьян А.А., Хоменко Б.И. Математическое моделирование динамики электровазов. – М.: Высшая школа, 1998. – 274 с.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Гардари, 2003. – 317 с.
9. Дунаевский С.Я., Крылов О.А., Мазия Л.В. Моделирование элементов электромеханических систем. – М.: Энергия, 1982. – 288 с.

**MODEL FOR THE DISTRIBUTION RESEARCH OF ELECTRIC POWER SYSTEM CONTACT
AC POWER-TRACTION COMPLEX OF MAIN ELECTRIC LOCOMOTIVES**

O. Bialobrzeski, T. Sukhonos, L. Kurys

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: seemAl@kdu.edu.ua

In the work lead is analysis of necessity an estimation of power processes in system a contact alternating current main – a traction complex of electric locomotive. Based on the analysis of power supply issues and the specific unit converting synthesized model which is based on traction electrotechnical complex of cart section electric locomotive VL80r. Model realizes a dispersal and braking action the engine an electric locomotive with zone a pulse potential regulation section of the power converter in AC–DC and DC–AC modes accordingly. In addition into model it is entered a subsystem of a contact network with variables on a way an electric locomotive parameters of active and inductances. It is allows to explore the qualitative and quantitative measures of transmission electricity mode on link: traction substation, contact network, electric cart. Based on the results of the study identified the need to use a filter-compensating device to reduce the harmonic content and improve the overall power factor.

Key words: mathematical model, an electric locomotive, a contact network, parameters mode.

REFERENCES

1. Pushkanova, P.A. (1985), *Electrovoz VL80r. Kerivnystvo z ekspluatatsii* [Electric locomotive VL80r. A management from operation], Transport, Moscow. (in Russian)
2. Sliptsova, M.A. (2006), *Osnovy electrychnogo transportu* [Bases of electric transport], Academy, Moscow. (in Russian)
3. Grishchenko, A.V. and Strekopitov, V.V. (2005), *Electriczni mashyny ta peretvoruvachi ruhomogo skladu* [Electric machines and converters of a rolling stock], Academy, Moscow. (in Russian)
4. Mackvardt, K.G. (1982), *Electropostachannya electroficovanyh zaliznyts* [Electrosuppl of the electrified railways], Transport, Moscow. (in Russian)
5. Kalinin, V.K. (1991), *Electrovozy i electropoyezda* [Electric locomotive and electric train], Transport, Moscow. (in Russian)
6. Zak, V.V., Zarifyan, A.A. and Kolpachyan, P.G. (2001), “Improvement on power parameters electric locomotives of a replaceable current with a zone-phase potential regulation”, *Visnyk SNU im. V. Dalya*, Vol. 4, no. 158, pp. 185–190. (in Russian)
7. Mikitenko, A.G., Plohov, E.M., Zarifyan, A.A. and Homenko, B.I. (1998), *Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki elektrovozov* [Mathematical modelling dynamics of electric locomotives], Visshaya shkola, Moscow. (in Russian)
8. Bessonov, L.A. (2003), *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoye pole* [Theoretical basis of an electrotechnics. The electromagnetic field], Gardary, Moscow. (in Russian)
9. Dunaevskiy, S.Y., Krylov, O.A. and Mazia, L.V. (1982), *Modelirovaniye elementov elektromekhanicheskikh sistem* [Modelling the elements of electromechanical systems], Energiya, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 22.05.2014.