УДК 629.4-592

Сидоренко Анатолій, аспірант
(аспірант кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Українського державного університету залізничного транспорту)

МОДЕЛЮВАННЯ ТЯГОВОГО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ

У роботі представлена математична модель системи електричної тяги з урахуванням варіації параметрів її об'єктів відповідно до перехресних зв'язків, просторової орієнтації рухомого складу та суб'єктивних факторів. Запропоновано підхід щодо математичного моделювання електричного тягового рухомого складу, як об'єкта формування енергообмінних процесів тягової мережі. Проведено верифікацію результатів моделювання з даними експлуатаційної роботи реального об'єкта та його паспортними даними.

Ключові слова: математична модель, тягова мережа, просторово-орієнтована схема, електропоїзд, схема заміщення.

Вступ. Урбанізація та постійне зростання попиту на мобільність провокують збільшення частки енергозатрат на пасажирські перевезення у транспортному секторі, де електричний моторвагонний рухомий склад є одним з основних представників серед інших видів транспорту.

Сьогодні монотонне зростання вартості енергоносіїв робить актуальним необхідність пошуку способів уникнення недоцільних втрат в енергетичному комплексі та досягнення раціональних режимів експлуатації електричного рухомого складу задля збереження за залізничним транспортом одного з провідних місць на ринку транспортних послуг.

Пошук шляхів рішення такого роду задач сьогодні передбачає використання в системі електричної тяги різного роду додаткових пристроїв та установок а саме: компенсаційних установок, різноманітних фільтрів та накопичувачів енергії. Особливо увага акцентується на накопичувачах енергії, котрі вирішують ряд задач, а саме: прийом енергії рекуперації; згладжування негативних піків навантаження і вирівнювання хвилинних, годинних і навіть добових графіків енергоспоживання; скорочення втрат в елементах тягової та первинної мережі; зниження величини встановленої потужності перетворювачів тощо. Хоча на сьогодні вже є достатньо значний багаж знань як в області теоретичних досліджень, так і зі сторони практичного застосування, проте прослідковується певна нестача інструментів, що дозволяли б проводити повноцінне імітаційне моделювання системи електричної тяги.

Володіння такого роду інструментами надає можливість оцінити вплив перехресних зв'язків між структурними елементами системи під час протікання енергообмінних процесів між ними, визначити полігони ефективного використання накопичувачів енергії, оцінити потенціал скорочення енергозатрат та техніко-економічний ефект від їх застосування. Отже пріоритетним завданням на сьогодні є розробка імітаційних комплексів системи електричної тяги із закладеною можливістю простої інтеграції моделей енергозберігаючих систем та базових даних для повного спектру інформації як на стадії проектування, так і експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Система електричної тяги – це складна багатофакторна система з взаємозалежними перехідними електромагнітними процесами.

DOI: 10.32703/2617-9040-2020-35-10

Дослідження відповідних процесів сприяють вирішенню задач оптимізації керування рухомим складом [1, 2], зниженню втрат за рахунок підвищення ефективності тягового обладнання [3, 4], поліпшенню показників якості та режимів споживання електричної енергії [2, 5], повторного використання відновленої енергії [2, 5–8], захисту від аварійних режимів і нештатних ситуацій [9], поліпшення електромагнітної сумісності [3] та ін.

У зв'язку з різноманітністю типів електричного тягового рухомого складу, схем та конструкцій систем тягового електропостачання більшість досліджень передбачають моделювання лише окремих структурних елементів системи електричної тяги зі спрощеним представленням інших протягом коротких часових інтервалів. У таких випадках це не дозволяє максимально наблизити умови моделювання до експлуатаційних та повноцінно враховувати перехресні зв'язки між структурними елементами системи. Також у більшості процесах дослідження дещо нівелюється вплив факторів, котрі носять випадковий характер та параметрів, що мають певну відносність, як приклад, просторову. Яскравим прикладом цього є система тягового електропостачання де схема її заміщення є «просторово-орієнтована». Тобто параметри схеми заміщення варіюються відповідно до просторового знаходження рухомого складу на профілю шляху. Таким чином в умовах актуальності пошуку рішень підвищення енергетичної ефективності системи електричної тяги існує необхідність розробки програмно-імітаційного комплексу, що має поєднувати в собі моделювання руху поїзда з максимальною наближеністю до картини поїзної роботи транспортних засобів.

Мета та завдання дослідження – є розробка комплексного математичного інструменту дослідження системи електричної тяги з урахуванням варіації параметрів її об'єктів у відповідності до їх перехресних зв'язків, просторової орієнтації та суб'єктивних факторів.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання:

- розробка математичної моделі системи тягового електропостачання постійного струму з двостороннім живленням двох шляхів, базуючись на просторово орієнтованій схемі заміщення;
- розробка універсального підходу з точки зору моделювання різних типів електричного тягового рухомого складу, як об'єкта системи електричної тяги у поєднанні з максимальною збалансованістю в аспекті мінімального часу симуляції.
- оцінка відповідності створеної моделі реальному об'єкту.

Матеріали та методи дослідження. В системі електричної тяги можна виділити два ключових об'єкти, а саме: систему тягового електропостачання та тягові рухомі одиниці.

Найбільшого розповсюдження набула двостороння схема живлення рухомого складу (рис. 1), оскільки забезпечує рівномірне завантаження тягових підстанцій та тягової мережі, високу надійність живлення тягових навантажень, знижені втрати потужності в елементах, низький вплив на лінії зв'язку та на підземні металеві споруди.

Аналіз характеру протікання струмів і напруг в системі «тягова мережа – рухомий склад» проводиться на базі методів розрахунку електричних кіл [10, 11]. У системах змінного струму найбільш зручним є вузловий метод формалізації та розрахунку електричного кола, в якому на основі матриці потенціалів вузлів розраховуються струми і напруги всіх гілок схеми заміщення міжстанційної зони.

У ланцюгах постійного струму (міський електричний транспорт, залізничний транспорт) більш ефективним є застосування контурної інтерпретації схеми. У подальшому розглядатиметься система живлення постійного струму рухомого складу метрополітену з електродинамічним гальмуванням.

Складність розробки математичної моделі просторово-орієнтованої схеми заміщення полягає у необхідності врахування великої кількості різного роду пристроїв та споруд, їх топології розміщення, місця знаходження тягових споживачів в межах міжстанційної зони [12–14]. Це призводить до варіації параметрів об'єктів системи та потребує її розгляду у вигляді множини миттєвих схем [14].

Одним з таких прикладів є тягова мережа метрополітену, що являє собою децентралізовану систему з двостороннім живленням контактної рейки від двох тягових підстанцій. Схема її заміщення подана на рис. 2. Електричні опори контактних (R_{k11} , R_{k22} , R_{k12} , R_{k21}) та ходових рейок (R_{p11} , R_{p22} , R_{p12} , R_{p21}) тягової мережі (рис. 2) представляються у вигляді функції місця знаходження тягового рухомого складу (s_i) в межах міжстанційної зони.

Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології», 2020. Вип. 35

Використання контурної інтерпретації схеми заміщення (рис. 2) розкриває можливість формування залежності струмів, що протікають в елементах тягової мережі та споживаються тяговими рухомими одиницями відповідно до різноманітних умов та станів окремих елементів системи електричної тяги та дає змогу враховувати варіацію параметрів елементів системи залежно від різноманітних плинних змінних (час, пройдений поїздом шлях). Повну систему струмів тягової мережі можна виразити за такими рівняннями:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_I - I_{IV}; & I_2 &= I_{III} - I_{II}; & I_3 &= -I_I; & I_4 &= -I_{IV}; & I_5 &= -I_{II}; & I_6 &= I_{III}; \\ I_7 &= I_I - I_{II}; & I_8 &= I_{III} - I_{IV}; & I_9 &= I_I; & I_{10} &= -I_{II}; & I_{11} &= -I_{IV}; & I_{12} &= I_{III}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $I_I, I_{II}, I_{III}, I_{IV}$, – контурні струми незалежних контурів I, II, III, IV відповідно:

$$I_I = \frac{E_1 \cdot b \cdot R_{n2}^2 - E_2 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2}^2 - E_1 \cdot b \cdot c \cdot d}{-R_{n1}^2 \cdot R_{n2}^2 + c \cdot d \cdot R_{n1}^2 + R_2 \cdot R_1 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2} + a \cdot b \cdot R_{n2}^2 - a \cdot b \cdot c \cdot d} +$$

$$+ \frac{E_2 \cdot c \cdot d \cdot R_{n1} - E_2 \cdot d \cdot R_{n1} \cdot R_2 + E_1 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2} \cdot R_2}{-R_{n1}^2 \cdot R_{n2}^2 + c \cdot d \cdot R_{n1}^2 + R_2 \cdot R_1 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2} + a \cdot b \cdot R_{n2}^2 - a \cdot b \cdot c \cdot d}; \quad (2)$$

$$I_{II} = \frac{-E_2 \cdot a \cdot R_{n2}^2 + E_1 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2}^2 + E_2 \cdot a \cdot c \cdot d - E_1 \cdot c \cdot d \cdot R_{n1} - E_2 \cdot a \cdot d \cdot R_2}{-R_{n1}^2 \cdot R_{n2}^2 + c \cdot d \cdot R_{n1}^2 + R_2 \cdot R_1 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2} + a \cdot b \cdot R_{n2}^2 - a \cdot b \cdot c \cdot d} +$$

$$+ \frac{E_1 \cdot a \cdot R_{n2} \cdot R_2 - E_1 \cdot R_{n2} \cdot R_2 \cdot R_1}{-R_{n1}^2 \cdot R_{n2}^2 + c \cdot d \cdot R_{n1}^2 + R_2 \cdot R_1 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2} + a \cdot b \cdot R_{n2}^2 - a \cdot b \cdot c \cdot d}; \quad (3)$$

$$I_{III} = \frac{E_2 \cdot d \cdot R_{n1}^2 - E_1 \cdot R_{n1}^2 \cdot R_{n2} - E_2 \cdot a \cdot b \cdot d}{-R_{n1}^2 \cdot R_{n2}^2 + c \cdot d \cdot R_{n1}^2 + R_2 \cdot R_1 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2} + a \cdot b \cdot R_{n2}^2 - a \cdot b \cdot c \cdot d} +$$

$$+ \frac{E_1 \cdot a \cdot b \cdot R_{n2} - E_1 \cdot b \cdot R_{n2} \cdot R_1 + E_2 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2} \cdot R_1}{-R_{n1}^2 \cdot R_{n2}^2 + c \cdot d \cdot R_{n1}^2 + R_2 \cdot R_1 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2} + a \cdot b \cdot R_{n2}^2 - a \cdot b \cdot c \cdot d}; \quad (4)$$

$$I_{IV} = \frac{-E_1 \cdot c \cdot R_{n1}^2 + E_2 \cdot R_{n1}^2 \cdot R_{n2} + E_1 \cdot a \cdot b \cdot c - E_2 \cdot a \cdot b \cdot R_{n2} - E_1 \cdot b \cdot c \cdot R_1}{-R_{n1}^2 \cdot R_{n2}^2 + c \cdot d \cdot R_{n1}^2 + R_2 \cdot R_1 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2} + a \cdot b \cdot R_{n2}^2 - a \cdot b \cdot c \cdot d} +$$

$$+ \frac{E_2 \cdot c \cdot R_{n1} \cdot R_1 - E_2 \cdot R_{n1} \cdot R_2 \cdot R_1}{-R_{n1}^2 \cdot R_{n2}^2 + c \cdot d \cdot R_{n1}^2 + R_2 \cdot R_1 \cdot R_{n1} \cdot R_{n2} + a \cdot b \cdot R_{n2}^2 - a \cdot b \cdot c \cdot d}; \quad (5)$$

a, b, c, d – коефіцієнти, що формують миттєві значення власних опорів I, II, III, IV незалежних контурів відповідно:

$$\begin{aligned} a &= R_{\kappa 11} + R_{n1} + R_{p11} + R_1; & b &= R_{n1} + R_{\kappa 12} + R_{p12} + R_2; & c &= R_{\kappa 22} + R_{n2} + R_{p22} + R_2; \\ d &= R_{n2} + R_{\kappa 21} + R_{p21} + R_1; \end{aligned} \quad (6)$$

$R_{\kappa 11}, R_{\kappa 12}$ – миттєві значення опорів, контактних рейок підстанційної зони підстанцій E_1 та E_2 відповідно під час прямування електропоїзда по i -й міжстанційній ділянці 1-го шляху:

$$R_{\kappa 11} = \rho_k \cdot \int_0^{s_i} v_{EPC1}(s_i) ds; \quad R_{\kappa 12} = \rho_k \cdot \left(s_i - \int_0^{s_i} v_{EPC1}(s_i) ds \right); \quad (7)$$

R_{p11} , R_{p12} – миттєві значення опорів, ходових рейок підстанційної зони підстанцій E_1 та E_2 відповідно під час прямування електропоїзда по i -й міжстанційній ділянці 1-го шляху:

$$R_{p11} = \rho_p \cdot \int_0^{s_i} v_{EPC1}(s_i) ds; \quad R_{p12} = \rho_p \cdot \left(s_i - \int_0^{s_i} v_{EPC1}(s_i) ds \right); \quad (8)$$

R_{k21} , R_{k22} – миттєві значення опорів, контактних рейок підстанційної зони підстанцій E_1 та E_2 відповідно під час прямування електропоїзда по i -й міжстанційній ділянці 2-го шляху:

$$R_{k21} = \rho_k \cdot \left(s_i - \int_0^{s_i} v_{EPC2}(s_i) ds \right); \quad R_{k22} = \rho_k \cdot \int_0^{s_i} v_{EPC2}(s_i) ds; \quad (9)$$

R_{p21} , R_{p22} – миттєві значення опорів, ходових рейок підстанційної зони підстанцій E_1 та E_2 відповідно під час прямування електропоїзда по i -й міжстанційній ділянці 2-го шляху:

$$R_{p21} = \rho_p \cdot \left(s_i - \int_0^{s_i} v_{EPC2}(s_i) ds \right); \quad R_{p22} = \rho_p \cdot \int_0^{s_i} v_{EPC2}(s_i) ds; \quad (10)$$

ρ_k – питомий електричний опір контактної рейки, Ом/м;

ρ_p – питомий електричний опір ходової рейки, Ом/м;

$v_{EPC1}(s_i)$ – лінійна швидкість електропоїзда, що рухається по i -й міжстанційній ділянці 1-го шляху, м/с;

$v_{EPC2}(s_i)$ – лінійна швидкість електропоїзда, що рухається по i -й міжстанційній ділянці 2-го шляху, м/с.

Отже, представлення схеми заміщення тягової мережі в такому вигляді значно спрощує розробку її математичної моделі та в подальшому полегшує проведення імітаційного моделювання та дозволяє вирішувати задачі оцінки втрат в елементах різноманітних частин системи тягового електропостачання, впливу на розхід електроенергії відхилень від графіка руху, формування рекомендацій по організації руху. Як приклад, в таблиці 1 приведено вихідні параметри тягової мережі метрополітену, необхідні для розрахунку [15].

Таблиця 1. Вихідні параметри тягової мережі метрополітену

Параметр	Номинальна напруга на виході тягової підстанції, В	Питомий електричний опір контактної рейки при температурі 15 °C ρ_k Ом/км	Питомий електричний опір ходових рейок при температурі 20 °C ρ_p , Ом/км		Опір фідера та відсмоктувальної лінії (R_1, R_2), Ом
Значення	825	0,0189	P50	P65	0,0037
			0,0318	0,0254	

В умовах різноманітності типів тягових електроприводів ускладненим є проведення повноцінного моделювання руху поїзда, в умовах наближених до експлуатаційних. Оскільки це вимагає достатньо глибокої деталізації моделі силової частини тягового електроприводу, його системи керування, механічної частини рухомого складу, з використанням повного переліку технічних параметрів, що в більшості випадків не перебувають в загальному доступі. Суттєвою

проблемою є також проведення симуляції протягом досить тривалого часу, котрий відповідав хоча б часу обороту поїзда, у зв'язку з необхідністю володіння програмно-обчислювальним комплексом достатньо високої потужності.

Для дослідження характеру протікання енергетичних процесів у тяговій мережі та використання розробленої математичної моделі як інструменту пошуку рішень по скороченню енергетичних втрат її в елементах, існує можливість представлення тягових та гальмівних характеристик тягового рухомого складу у вигляді табличних функцій, відповідно до миттєвого значення напруги на його струмоприймачах та лінійної швидкості руху. Достатнім є приведення табличних функцій тягових та гальмівних характеристик для двох значень напруг, наприклад, максимально та мінімально допустимої (рис. 3, рис. 4). Це дозволяє, використавши один зі способів інтерполяції, відтворити вплив зміни напруги живлення тягового електроприводу на реалізацію тягового та гальмівного зусилля.

Рис. 3. Тягова характеристика вагона метрополітену модель 81-7036 з обмеженнями по швидкості та напрузі живлення приведена до однієї привідної осі

Рис. 4. Гальмівна характеристика вагона метрополітену модель 81-7036 з обмеженнями по швидкості та напрузі живлення приведена до однієї привідної осі

Важливим аспектом при проведенні моделювання такого типу систем є створення можливості здійснювати варіації основних показників експлуатаційної роботи у графіку руху поїздів, для максимального наближення умов до реальних. Тобто забезпечити можливість зміни часу стоянок, ходової швидкості для конкретної ділянки, пасажирообіг тощо, імітуючи ймовірнісний графік руху поїздів.

Доцільним є також забезпечення можливості формувати різноманітні профілі шляху, будь-то готовий виконавчий профіль чи умовний з різними категоріями складності, де присутніми має бути здатність зміни плану профілю: кількості міжстанційних ділянок, їх довжини, місця знаходження підйомів, спусків, кривих відповідно до сформованого профілю руху, їх значення та довжини.

Слід також відмітити, що вимоги до математичної моделі було чітко сформовано у відповідності визначеним задачам, а саме: можливості оцінки поліпшення показників якості та режимів споживання електричної енергії, зниження втрат за рахунок підвищення ефективності тягового обладнання, вплив суб'єктивних факторів на рівень енергоспоживання. При розробці математичної моделі, відповідно до поставлених задач по дослідженню тягово-енергетичних процесів в системі електричної тяги, приймалися такі допущення: електропоїзди представлені у вигляді матеріальних точок, тягове та гальмівне зусилля рівномірно розподіляється між усіма тяговими осями, споживання електроенергії додатковим електрообладнанням не враховується, втрати в елементах тягового електроприводу не враховуються, енергія від реалізації електричного гальмування розсіюється на гальмівних резисторах в повному об'ємі, питомі електричні опори контактних та ходових рейок рівні для всієї ділянки прямуювання, температура контактних рейок знаходиться на рівні 15 °C, додаткові опори від рейкових стиків не враховуються, тягові підстанції розглядаються як джерела електрорушійної сили з внутрішнім опором, не враховується наявність між колійних перемичок, розглядається умовний профіль руху з трьома міжстанційними ділянками рівної довжини (1700 м) з різними елементами профілю (площадка, ухил, підйом).

Оцінка коректності розробленої математичної моделі проводилася шляхом її симуляції на базі програмного продукту Matlab з використанням графічного середовища імітаційного моделювання Simulink. Як числовий алгоритм інтегрування застосовувався дискретний час з фіксованим періодом дискретизації рівним 0,001 с. За вихідні дані було прийнято параметри приведені в таблиці 1 та просторові графіки тягової та гальмівної характеристик вагона метрополітену моделі 81-7036 (рис. 3, 4) [1]. Імітаційне моделювання здійснювалось 630 с. під час якого проводилася симуляція роботи двох електропоїздів на умовному плані профілю при децентралізованому двосторонньому живленні контактної рейки кожного із шляхів від двох тягових підстанцій на трьох міжстанційних ділянках станцій *A*, *B*, *C* і *D* (рис. 5). Перегінний час ходу поїздів прийнятий 170 с. В процесі симуляції здійснюється варіація часу стоянки на станціях, шляхом додавання так званого часу затримки (t_{zamp}) до часу визначеного як нормативний час стоянки ($t_{cm}=30$ с.) (рис. 5) для моделювання руху поїздів з випадковими відхиленнями від графіка руху.

Це забезпечило можливість врахування виникнення різноманітного збігу обставин та непрогнозованої завантаженості конкретної станції.

На рис. 6 приведено осцилограми роботи вагона метрополітену моделі 81-7036 на одній з міжстанційних ділянок лінії з децентралізованим двостороннім живленням контактної рейки від двох тягових підстанцій. Верифікація результатів імітаційного моделювання (рис. 5) з пакетом даних отриманих в ході експлуатації реального об'єкта (рис. 1) демонструє подібність характеру протікання процесів.

Слід відмітити що на всьому діапазоні швидкостей руху електропоїзда забезпечується прискорення на рівні $1,1 \text{ м/с}^2$ та уповільнення $1,2 \text{ м/с}^2$, що відповідає паспортним показникам тягового рухомого складу (табл. 2) на базі тягових та гальмівних характеристик якого проводилось імітаційне моделювання.

Рис. 5. Осцилограми роботи електропоїздів метрополітену на умовному плані профілю, отримані в ході імітаційного моделювання:

$EPC1, EPC2$ – електричний рухомий склад на 1-му та 2-му шляху відповідно; I_{n1}, I_{n2} – сумарний струм на вході тягових інверторів $EPC1$ та $EPC2$ відповідно; U_{n1}, U_{n2} – напруга на струмоприймачах $EPC1$ та $EPC2$ відповідно; v_1, v_2 – лінійні швидкості руху $EPC1$ та $EPC2$ відповідно; t_{cm} – час стоянки на станції відповідно до графіку руху; $t_{затр}$ – час затримки на станції

Рис. 6. Осцилограми роботи електропоїзду на одній із ліній Харківського метрополітену

Таблиця 2. Базові параметри силової установки вагона метрополітену модель 81-7036

Параметр	Значення
Напруга живлення	750 В DC
Номінальна потужність	700 кВт
Максимальний момент на валу електродвигуна	1470 Нм
Прискорення транспортного засобу	1,12 м/с ²
Уповільнення транспортного засобу	1,2 м/с ²
Максимальна швидкість вагона при постійності моменту	32 км/год
Максимальна швидкість вагона при постійності потужності	100 км/год
Максимальна швидкість вагона	100 км/год

В ході симуляції імітаційної моделі не виявлено жодних аномальних значень тягового струму як під час режиму тяги, так і в процесі електродинамічного гальмування (рис. 5), його значення не перевищує номінальне значення вхідного струму тягового перетворювача (270 А), а функція зміни на етапі розгону поїзда, демонструє монотонність, що також перекликається з осцилограмами тягового струму об'єкта на базі якого проводилося імітаційне моделювання (рис. 6).

На рис. 5 приведено осцилограми напруги на струмоприймачах EPC1 та EPC2. Дані осцилограми демонструють, що характер коливань напруги на струмоприймачах визначений не лише величиною енергоспоживання кожного із тягових споживачів а й зміною параметрів елементів тягової мережі (R_{k11} , R_{k12} , R_{k21} , R_{k22} , R_{p11} , R_{p12} , R_{p21} , R_{p22}) відповідно до просторової орієнтації тягових споживачів на конкретному шляху прямування в межах міжстанційної ділянки та присутністю суб'єктивного фактора при здійсненні поїзної роботи. Особливо ця картина розкрита в межах міжстанційної ділянки станцій А і В при роботі EPC1, де характер зміни напруги, з присутністю різко змінних коливань, на струмоприймачах з 10 по 152 с. викликана накладенням зміни інтенсивності тягового енергоспоживання, перерозподілом часток енергії між тяговими підстанціями в результаті зміни електричних параметрів системи, відхилення від нормативного графіка руху та наявності перехресних зв'язків між тяговими рухомими одиницями (рис. 5). Що підтверджується отриманими результатами експериментальних досліджень під-час експлуатації реального об'єкта.

Достатньо детально модель відтворює перерозподіл потоків енергії між елементами тягової мережі (рис. 7, 8).

Рис. 7. Осцилограми протікання струмів в елементах тягової мережі метрополітену, отримані в ході імітаційного моделювання:

I_3 – струми контактних рейок підстанційної зони підстанції E_1 шляху 1; I_5 – струми контактних рейок підстанційної зони підстанції E_2 шляху 1

Рис. 8. Осцилограми протікання струмів в елементах тягової мережі метрополітену, отримані в ході імітаційного моделювання:

I_4 – струми контактних рейок підстанційної зони підстанції E_1 шляху 2; I_6 – струми контактних рейок підстанційної зони підстанції E_2 шляху 2

Особливо акцентує увагу наявність від'ємних значень струмів в контактних та ходових рейках. Дане явище ми можемо спостерігати і на вимірювальних комплексах засобів моніторингу та контролю енергоспоживання метрополітену в точках обліку тягової мережі. Це викликано встановленням струмового шунта на фідері живлення кожної підстанційної зони тягових підстанцій відповідного шляху.

Висновки. Таким чином отримані результати імітаційного моделювання демонструють, що запропонована концепція математичної моделі достатньо точно ілюструє особливості протікання енергообмінних процесів між об'єктами тягової мережі, відображаючи особливості фізичної топології мережі, вагомість необхідності врахування просторової орієнтації тягового рухомого складу та надає можливість оцінити вплив присутності суб'єктивного фактора на розподіл частот тягового енергоспоживання. Запропонований спосіб моделювання тягового рухомого складу шляхом знаходження проміжних значень за наявним дискретним набором точок тягових та гальмівних характеристик продемонстрував свою збалансованість в аспекті мінімального часу симуляції без використання поетапного моделювання на базі початкових значень змінних моделі та коректність роботи, що підкріплюється відповідністю отриманих результатів паспортним даним реального об'єкту та експериментальним даним його роботи. Запропонований підхід моделювання енергообмінних процесів може бути використаний в якості інструменту під час пошуку рішень з підвищення енергоефективності систем електричної тяги.

ЛІТЕРАТУРА

1. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1, № 9. P. 48–57. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154520.
2. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Y., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage. *International journal of renewable energy research*. 2019. Vol. 9, № 2. P. 848–858.
3. Панченко С. В., Блиндюк В. С., Бабаєв М. М., Яцько С. І., Ващенко Я. В. Системи електропостачання електричного рухомого складу залізниць і метрополітенів. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 243 с.
4. Яцько С. І., Карпенко Н. П., Ващенко Я. В., Панченко В. В. Розвиток обладнання розподільних пристроїв тягового електропостачання. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2017. № 172. С. 37–48. doi: 10.18664/1994-7852.172.2017.116689
5. Сулим А. А. Исследование энергообменных процессов при эксплуатации подвижного состава метрополитена с системами рекуперации и накопителями энергии. *Інформаційні, телекомунікаційні та ресурсозберігаючі технології*. 2016. Вип. 28. С. 137–146.
6. Шевлюгин М. В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореф. дис. ... д-ра тех. наук: спец. 05.09.03. Москва, 2013. 339 с.
7. Sulym A. On the question of a reasonability of capacitive storages use in the metro. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2015. Вип. 1, № 29. С. 94–100.
8. Саблін О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. Вип. 6, № 8. С. 9–13. doi: 10.15587/1729-4061.2014.30483.
9. Sytnik B., Bryksin V., Yatsko S., Vashchenko Y. Construction of an analytical method for limiting the complexity of neural-fuzzy models with guaranteed accuracy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, № 4. P. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2019.160719.
10. Могила В. С., Ананьева О. С., Загорцев В. А. Подольская В. Н. Имитационная модель совместной работы системы тягового электроснабжения и электрического подвижного состава. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2017. Вып. 2, № 54. С. 191–196.
11. F. Du, J. H. He, L. Yu, M. X. Li, Z. Q. Bo, A. Klimek Modeling and Simulation of Metro DC Traction System with Different Motor Driven Trains. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, 2010. P. 1–4. doi: 10.1109/APPEEC.2010.5448372.
12. M. X. Li, J. H. He, Z. Q. Bo, H. T. Yip, L. Yu, A. Klimek Simulation and algorithm development of protection scheme in DC traction system. 2009 IEEE Bucharest PowerTech. Bucharest, 2009. P. 1–6. doi: 10.1109/ptc.2009.5282111.
13. R. Mathew, F. Flinders, W. Oghana Locomotive "Total System" Simulation Using Simulink. International Conference on Electric Railways in a United Europe. Amsterdam, 1995. P. 202–206. doi: 10.1049/cp:19950207.

14. Brenna, M., Foiadelli, F., Leone, C., & Casiraghi, F. M. Modeling and Simulation of Railway Network in Compliance with Technical Specifications for Interoperability. 2019 AEIT International Annual Conference. Florence, 2019. P. 1-6. doi: 10.23919 / AEIT.2019.8893360.

15. Быков Е. И., Панин Б. В., Пупынин В. Н. Тяговые сети метрополитенов. Москва: Транспорт, 1987. 256 с.

REFERENCES

1. Yatsko S., Sytnik, B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. (2019) Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. vol. 1, no. 9, pp. 48–57. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154520.
2. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Y., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. (2019) Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage. *International journal of renewable energy research*., vol. 9, no. 2, pp. 848–858.
3. Sytnik B., Bryksin V., Yatsko S., Vashchenko Y. (2019) Construction of an analytical method for limiting the complexity of neural-fuzzy models with guaranteed accuracy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. vol. 2, no. 4, pp. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2019.160719.
4. Yats'ko S. I., Karpenko N. P., Vashchenko Ya. V., Panchenko V. V. (2017) Rozvitok obladnannya rozpodil'nikh pristroiv tyagovogo elektropostachannya [Development of traction power switchgear equipment]. *Zbirnik naukovikh prats' UkrDUZT*. no. 172, pp. 37–48. doi: 10.18664/1994-7852.172.2017.116689.
5. Sulim A. A. (2016) Issledovanie energoobmennyykh protsessov pri ekspluatatsii podvizhnogo sostava metropolitena s sistemami rekuperatsii i nakopitelyami energii [Study of energy-exchange processes during the operation of the metro rolling stock with recovery systems and energy storage]. *Informatsiyi, telekomunikatsiyi ta resursozberigayuchi tekhnologii*. vol. 28, pp. 137–146.
6. Shevlyugin M. V. (2013) *Energoberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuemye s ispol'zovaniem nakopiteley energii: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: spets. 05.09.03* [Energy-saving technologies in railway transport and subways, implemented using energy storage. Dr. eng. Sci. diss.]. Moskva. 339 p.
7. Sulym A. (2015) On the question of a reasonability of capacitive storages use in the metro. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*. vol. 1, no. 29, pp. 94–100.
8. Sablin O. I. (2014) Doslidzhennya efektyvnosti protsesu rekuperatsii elektroenerгии v umovakh metropolitenu [Investigation of the efficiency of the process of electricity recovery in underground conditions]. *Shidno-Yevropejskij zhurnal peredovih tekhnologij*. vol. 6, № 8, pp. 9–13. doi: 10.15587/1729-4061.2014.30483.
9. Sytnik B., Bryksin V., Yatsko S., Vashchenko Y. (2019) Construction of an analytical method for limiting the complexity of neural-fuzzy models with guaranteed accuracy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. vol. 2, no. 4, pp. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2019.160719.
10. Mogila V. S., Anan'eva O. S., Zagortsev V. A. Podol'skaya V. N. (2017) Imitatsionnaya model' sovmestnoy raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya i elektricheskogo podvizhnogo sostava [Simulation model of joint operation of traction power supply system and electric rolling stock]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. vol. 2, no. 54, pp. 191–196.
11. F. Du, J. H. He, L. Yu, M. X. Li, Z. Q. Bo, A. Klimek. (2010) Modeling and Simulation of Metro DC Traction System with Different Motor Driven Trains. *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. Chengdu, pp. 1–4. doi: 10.1109/APPEEC.2010.5448372.
12. M. X. Li, J. H. He, Z. Q. Bo, H. T. Yip, L. Yu, A. Klimek (2009) Simulation and algorithm development of protection scheme in DC traction system. *2009 IEEE Bucharest PowerTech*. Bucharest, pp. 1–6. doi: 10.1109/ptc.2009.5282111.
13. R. Mathew, F. Flinders, W. Oghana (1995) Locomotive "Total System" Simulation Using Simulink. *International Conference on Electric Railways in a United Europe*. Amsterdam, pp. 202–206. doi: 10.1049/cp:19950207.
14. Brenna, M., Foiadelli, F., Leone, C., & Casiraghi, F. M. (2019) Modeling and Simulation of Railway Network in Compliance with Technical Specifications for Interoperability. *2019 AEIT International Annual Conference*. Florence, , pp. 1-6. doi: 10.23919 / AEIT.2019.8893360.
15. Bykov E. I., Panin B. V., Pupynin V. N. (1987) Tyagovye seti metropolitenov [Subway traction networks]. Moskva, Transport, 256 p.

Сидоренко Анатолий Николаевич, аспирант

(аспирант кафедры «Электроэнергетика, электротехника та электромеханика» Украинского государственного университета железнодорожного транспорта)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

В работе представлена математическая модель системы электрической тяги с учетом вариации параметров ее объектов в соответствии с перекрестными связями, пространственной ориентации подвижного состава и субъективных факторов. Предложен подход математического моделирования электрического тягового подвижного состава, как объекта формирования энергообменных процессов тяговой сети. Проведено верификацию результатов моделирования с данными эксплуатационной работы реального объекта и его паспортными данными.

Ключевые слова: математическая модель, тяговая сеть, пространственно-ориентированная схема, электропоезд, схема замещения.

Sidorenko Anatolii postgraduate student

(Postgraduate student department “Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electromechanics” of the Ukrainian State University of Railway Transport)

MODELING OF TRACTION-ENERGY PROCESSES IN THE ELECTRIC TRACTION SYSTEM

The paper presents a mathematical model of a subway electric traction system, taking into account the variation of the parameters of the system objects according to their cross-connections, spatial orientation and subjective factors. The peculiarities of mathematical modeling of the subway traction network with decentralized bilateral power supply of the contact rail from two traction substations are outlined, its substitution scheme is shown. A mathematical model of the subway traction network with decentralized two-sided feed of the contact rail from two traction substations has been developed. An approach to mathematical modeling of electric traction rolling stock as an object of formation of energy exchange processes in an electric traction system is proposed. The mathematical model is based on the presentation of its traction and braking characteristics in the form of tabular functions using interpolation to find the intermediate values of traction and braking force, as a function of not only the linear speed of movement but also other values. To confirm the correctness of the proposed mathematical fashion for the study of traction and energy processes in the system of electric traction, its simulation was performed. The simulation model was developed and simulated using Matlab software using the Simulink simulation graphical environment. As a traction moving unit was considered a subway car model 81-7036, was formed a conditional profile of movement with characteristic elements for the subway, namely the profile of movement with three interstation sections of equal length (1700 m) with different elements (platform, slope, lift). The result was a comparative evaluation of the simulation results obtained with the data package obtained during the operation of the real object and the correspondence of the obtained results with the passport data of the real object and the experimental data of his work. Attention is drawn to the need to take into account the variation of the electrical parameters of the traction network during rolling stock rolling stock.

Keywords: mathematical model, traction network, space-oriented scheme, electric trains, substitution schem.