

II. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК. 629.423.14

Слободенюк Ю. О.¹, Бялобржеський О. В.²¹Аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна,
E-mail: jul.alexandrovna@gmail.com²Канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна

МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ МИТТЄВИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ РУСІ ЕЛЕКТРОВОЗУ

На підставі аналізу моделей розрахунку електричних параметрів режиму систем тягового електропостачання виявлені недоліки пов'язані з дискретністю розрахунку та складнощами використання при несинусоїдальних струмах, що властиво сучасним тяговим комплексам з напівпровідниковими перетворювачами. Метою роботи було створення безперервної моделі розрахунку миттєвих параметрів системи електропостачання з розрахунком параметрів якості електроенергії. З використанням методів теорії електротехніки розроблена модель безперервного розрахунку миттєвих параметрів режиму систем тягового електропостачання, відрізняється від тих, які використовувались раніше тим, що вихідними даними є не середні значення, а попередньо визначені миттєві значення струму і швидкості електровозу. Модель на відміну від аналізованих не має великої дискретності розрахунків, що значно підвищує якість розрахунку при різкій зміні між різними режимами роботи електровозів та інформативність при розрахунку показників якості електроенергії. Реалізована можливість у безперервному режимі для всього інтервалу моделювання на підставі місця розташування електровозів, які рухаються, розраховувати розподіл падіння напруги, втрат потужності та коефіцієнт несинусоїдальності напруги для кожного з електровозів у місці контакту.

Ключові слова: система тягового електропостачання, миттєві параметри, графік руху, параметри режиму.

ВСТУП

Для розрахунку параметрів систем тягового електропостачання (СТЕ) використовують метод рівномірного перерізу графіка руху поїздів [4]. Згідно з методом для кожного перерізу графіку руху розраховуються активні та реактивні компоненти основної гармоніки струму плечей підстанцій, повних струмів плечей підстанцій, втрати напруги в мережі до навантаження та втрати в лінії з двостороннім живленням. Таким чином графіки руху й криві тягових розрахунків повністю визначають графік зміни будь-якого показника роботи системи електропостачання електрифікованих залізниць [4]. Метод має високу ефективність при проектуванні контактної мережі та тягових підстанцій, але його ефективність знижується в сучасних умовах експлуатації рухомого складу та тягової мережі. По-перше, метод вимагає певну дискретність перетинів, що під час різкої зміни режиму споживання може призвести до виключення цього моменту з уваги; по-друге, широке впровадження керованого тягового електроприводу, потребує врахування вищих гармонійних складових струму та напруги, для визначення заходів з підвищення якості електричної енергії контактної мережі.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для аналізу роботи СТЕ може бути використано спосіб моделювання, що безпосередньо відтворює хід процесів у реальній послідовності подій [1]. Цей спосіб моделювання ускладнюється необхідністю імітації переміщення електровозів на ділянці, яка аналізується за запланованим графіком їх руху. І фізичні і віртуальні моделі у цьому випадку імітують процес шляхом послідовних один за одним окремих дискретних подій, які розділені невеликими інтервалами часу. Чим точніше треба отримати результат, тим більше повинно бути ділянок на яких імітується переміщення електровозів, що значно ускладнює модель. Основним недоліком даного способу моделювання залишається дискретність розрахунків.

Для усунення зазначеного недоліку розглянемо схему для ділянки СТЕ, наведену на рис. 1, на якій зображені A, B – тягові підстанції; E_A, E_B – ЕРС тягових підстанцій; 1, 2 – електровози, які живляться від СТЕ; i_1, i_2 – струми споживані електровозом 1 та 2 відповідно; l_{A1}, l_{B2} – відстань від електровозу 1 до підстанції A та від електровозу 2 до підстанції B відповідно; l_{AB} – відстань між підстанціями; l_{12} – відстань між електровозами; $R_{A1}, R_{12}, R_{B2}, L_{A1}, L_{12}, L_{B2}$ – активний опір та індуктивність на ділянках. При цьому ємнісною провідністю згідно з [1], зневажаємо.

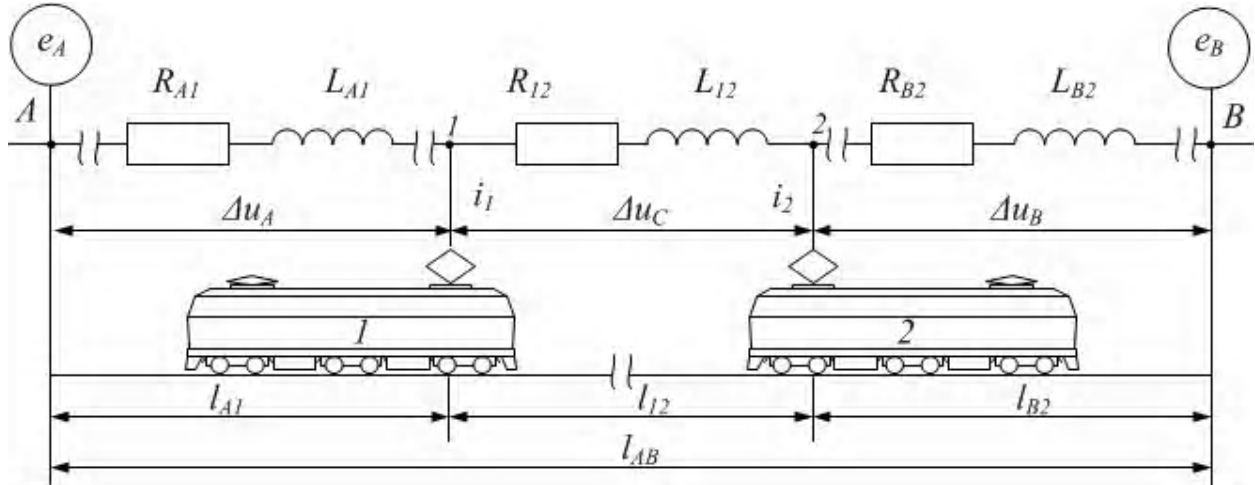


Рисунок 1 – Розрахункова схема СТЕ електровозів на міжпідстанційній ділянці А-В

ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ

Відповідно до методу [1, 2] вихідними даними для розрахунку є струм та положення електровозу. В роботі [5], розроблена модель електротехнічного комплексу електровозу з тяговими двигунами змінного струму. Використання вказаної моделі дозволяє задаючи графік руху електровозу отримати миттєві значення змінного струму з урахуванням роботи перетворювачів та швидкість руху в статичних та динамічних режимах. Для визначення шляху, пройденого електровозом, достатньо розрахувати лінійну швидкість

$$v = \omega \cdot k_v, \quad (1)$$

де $k_v = \frac{v_n}{\omega_n}$ – коефіцієнт зв'язку між лінійною та кутовою швидкістю; та шляхом інтегрування лінійної швидкості розрахувати шлях

$$l_k = \int v(t) dt. \quad (2)$$

Таким чином вхідними параметрами обрано струм та шлях, у результаті потрібно визначити миттєві параметри завантаження тягових підстанцій під час руху електровозів, значення напруги в точці підключення електровозу, активну та реактивну потужності контактної лінії.

Для схеми зображеної на рис. 1 рівняння за першим законом Кірхгофа:

$$\begin{cases} i_A + i_C - i_1 = 0; \\ i_B - i_C - i_2 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де i_A, i_B, i_C – струми на ділянках СТЕ відповідно l_{A1}, l_{12}, l_{B2} . За другим законом Кірхгофа рівняння для зовнішнього контуру (рис. 1)

$$\begin{aligned} e_A + i_A R_{A1} + L_{A1} \frac{di_A}{dt} - i_C R_{12} - \\ - L_{12} \frac{di_C}{dt} - i_B R_{B2} - L_{B2} \frac{di_B}{dt} - \\ - e_B = 0; \end{aligned}$$

використовуючи операторну форму запису:

$$\begin{aligned} e_A + i_A R_{A1} + i_A L_{A1} p - \\ - i_C R_{12} - i_C L_{12} p - \\ - i_B R_{B2} - i_B L_{B2} p - e_B = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Припустимо, що ЕРС джерела живлення А і В однакові, зневажаючи зрівняльними струмами, як зазначено у роботі [3] маємо

$$\begin{aligned} (i_1 - i_C) R_{A1} + (i_1 - i_C) L_{A1} p - \\ - i_C R_{12} - i_C L_{12} p - (i_2 + i_C) R_{B2} - \\ - (i_1 - i_C) L_{B2} p = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Визначаємо через струми електровозів i_1 та i_2 струм на ділянці СТЕ i_C

$$i_C = \frac{i_1 (R_{A1} + L_{A1} p) - i_2 (R_{B2} + L_{B2} p)}{(R_{A1} + R_{12} + R_{B1}) + (L_{A1} + L_{12} + L_{B1}) p}. \quad (6)$$

Відповідно за рівняннями (3) та (6) струми підстанцій А та В

$$\begin{aligned} i_B = \frac{i_1 (R_{A1} + L_{A1} p) - i_2 (R_{B2} + L_{B2} p)}{(R_{A1} + R_{12} + R_{B1}) + (L_{A1} + L_{12} + L_{B1}) p} \\ + i_2, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} i_A = i_1 - \\ - \frac{i_1 (R_{A1} + L_{A1} p) - i_2 (R_{B2} + L_{B2} p)}{(R_{A1} + R_{12} + R_{B1}) + (L_{A1} + L_{12} + L_{B1}) p}. \end{aligned} \quad (8)$$

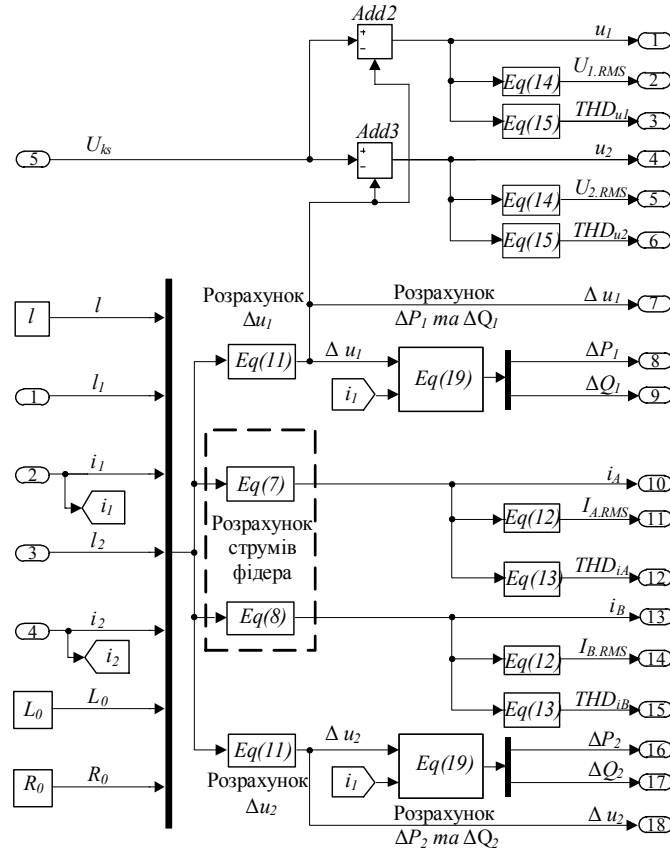


Рисунок 2 – Підсистема з розрахунковими блоками

Омічний опір та індуктивність контактної мережі (КМ) змінюється під час руху. Виконаємо заміну в (6–8) $R_p = R_0 \cdot l_i$ та $L_i = L_0 \cdot l_i$, де R_i та L_i відповідно $R_{A1}, R_{12}, R_{B2}, L_{A1}, L_{12}, L_{B2}$, а R_0, L_0 – погонні значення омічного опору та індуктивності.

$$\begin{cases}
 i_A = i_1 - \frac{i_1(R_0 + L_0 p)l_{A1}}{(R_0 + L_0 p)l_{AB}} + \\
 + \frac{i_2(R_0 + L_0 p)l_{B2}}{(R_0 + L_0 p)l_{AB}} = i_1 - \frac{i_1 l_{A1}}{l_{AB}} + \frac{i_2 l_{B2}}{l_{AB}}; \\
 i_B = \frac{i_1(R_0 + L_0 p)l_{A1}}{(R_0 + L_0 p)l_{AB}} - \frac{i_2(R_0 + L_0 p)l_{B2}}{(R_0 + L_0 p)l_{AB}} + i_2 = \\
 = \frac{i_1 l_{A1}}{l_{AB}} - \frac{i_2 l_{B2}}{l_{AB}} + i_2; \\
 i_C = \frac{i_1(R_0 + L_0 p)l_{A1}}{(R_0 + L_0 p)l_{AB}} + \\
 + \frac{i_2(R_0 + L_0 p)l_{B2}}{(R_0 + L_0 p)l_{AB}} = \frac{i_1 l_{A1}}{l_{AB}} + \frac{i_2 l_{B2}}{l_{AB}}.
 \end{cases} \quad (9)$$

Виходячи зі струмів можна визначити втрати напруги для ділянок СТЕ (рис. 1)

$$\begin{cases}
 \Delta u_{A1} = i_A R_0 l_{A1} + i_A L_0 p l_{A1} = \\
 = \left(i_1 - \frac{i_1 l_{A1}}{l_{AB}} + \frac{i_2 l_{B2}}{l_{AB}} \right) R_0 l_{A1} + \\
 + \left(i_1 - \frac{i_1 l_{A1}}{l_{AB}} + \frac{i_2 l_{B2}}{l_{AB}} \right) L_0 p l_{A1}; \\
 \Delta u_{12} = i_C R_0 l_{12} + i_C L_0 p l_{12} = \\
 = \left(\frac{i_1 l_{A1}}{l_{AB}} - \frac{i_2 l_{B2}}{l_{AB}} \right) R_0 l_{A1} + \\
 + \left(\frac{i_1 l_{A1}}{l_{AB}} - \frac{i_2 l_{B2}}{l_{AB}} \right) L_0 p l_{A1}; \\
 \Delta u_{B2} = i_B R_0 l_{B2} + i_B L_0 p l_{B2} = \\
 = \left(\frac{i_1 l_{A1}}{l_{AB}} - \frac{i_2 l_{B2}}{l_{AB}} + i_2 \right) R_0 l_{A1} + \\
 + \left(\frac{i_1 l_{A1}}{l_{AB}} - \frac{i_2 l_{B2}}{l_{AB}} + i_2 \right) L_0 p l_{A1}.
 \end{cases} \quad (10)$$

Слід зазначити, що при розрахунку за рис.1 обрано певне розташування електровозів, при русі, через певний час розташування зміниться, що слід враховувати при визначенні падіння напруги для кожного електровозу. Таке урахування відповідно до [1], виконано введенням додаткової умови, яка полягає у зустрічі електровозів та переході до фідера іншої тягової підстанції, зокрема для першого електровозу:

$$\Delta u_1 = \begin{cases} \left(i_1 - \frac{i_1 l_{1A}}{l_{AB}} + \frac{i_2 l_{2B}}{l_{AB}} \right) R_0 l_{A1} + \\ + \left(i_1 - \frac{i_1 l_{1A}}{l_{AB}} + \frac{i_2 l_{2B}}{l_{AB}} \right) L_0 p l_{A1}, \\ \text{if } l_{A1} \leq l_{2B}; \\ \left(i_2 - \frac{i_2 l_{2B}}{l_{AB}} + \frac{i_1 l_{1A}}{l_{AB}} \right) R_0 (l_{AB} - l_{A1}) + \\ + \left(i_2 - \frac{i_2 l_{2B}}{l_{AB}} + \frac{i_1 l_{1A}}{l_{AB}} \right) L_0 p (l_{AB} - l_{A1}), \\ \text{if } l_{A1} > l_{2B}. \end{cases} \quad (11)$$

Аналогічно розраховується падіння напруги для другого електровозу. За рівняннями (9–11) в пакеті візуального програмування Simulink побудована підсистема розрахунку рис. 2, в якій додатково введені блоки, що забезпечують визначення інтегральних показників:

– діючого значення струму фідера відповідної підстанції [6]

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t i^2 dt}, \quad (12)$$

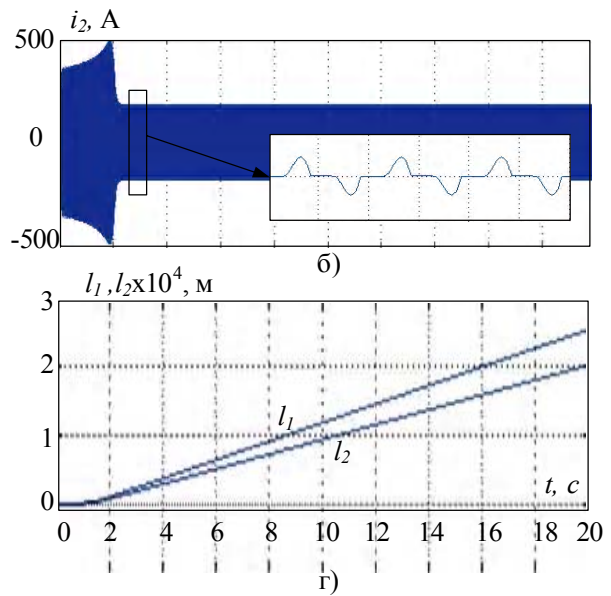
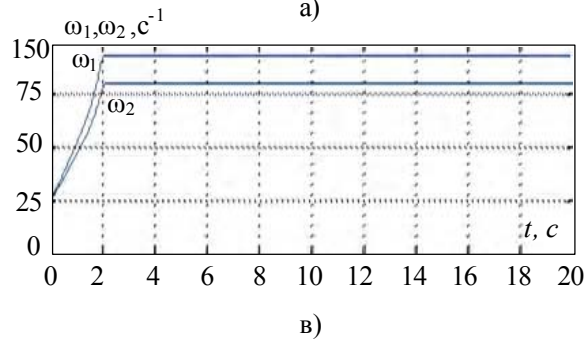
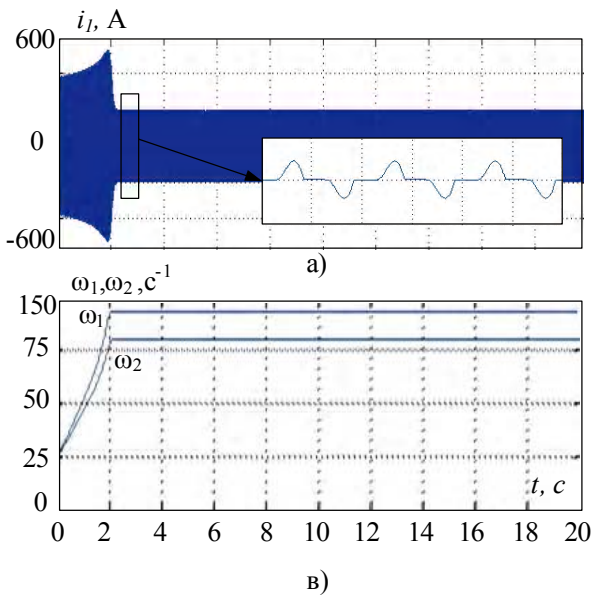


Рисунок 3 – Вихідні данні моделювання: а – зміна в часі миттєвого значення струму 1 електровоза; б – зміна в часі миттєвого значення струму 2 електровоза; в – зміна в часі миттєвого значення швидкості 1 та 2 електровоза; г – шлях подоланий 1 та 2 електровозом

– коефіцієнту спотворення струму (THD_i) [6]

$$THD_i = \frac{\sum I_h}{I_f}, \quad (13)$$

де I_h – діюче значення вищих гармонік струму; I_f – діюче значення фундаментальної гармоніки струму;

– діючого значення напруги

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t u^2 dt}, \quad (14)$$

– коефіцієнту спотворення напруги (THD_u)

$$THD_u = \frac{\sum U_h}{U_f}, \quad (15)$$

де U_h – діюче значення вищих гармонік напруги; U_f – діюче значення фундаментальної гармоніки напруги.

Втрата активної та реактивної потужності на ділянці лінії із двостороннім живленням [6]

$$\begin{cases} DP = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t u i dt, \\ DQ = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t u \frac{di}{dt} dt. \end{cases} \quad (19)$$

Значення L_0 та R_0 у підсистемі, зображеній на рис. 2, відповідають значенням погонних індуктивності та активного опору для СТЕ 2х25кВ і чисельно дорівнюють $L_0=0,001$ Гн/м та $R_0=0,186$ Ом/м [3]. Відстань між підстанціями прийнята $l=25$ км.

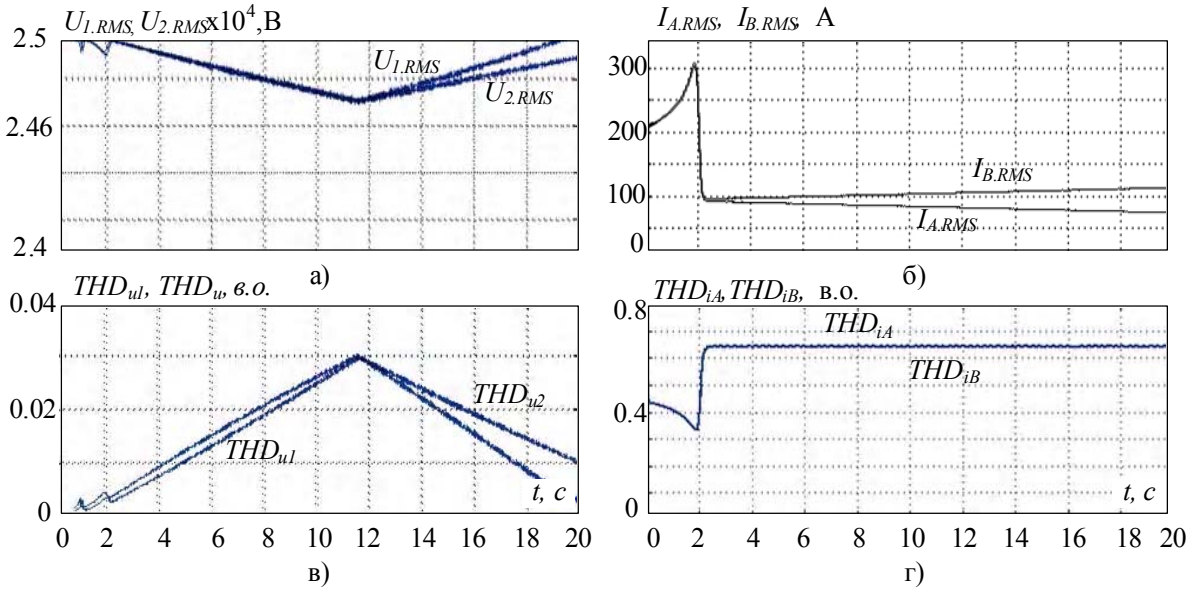


Рисунок 4 – Результати моделювання: а – зміна в часі діючого значення втрати напруги до 1 та 2 електровозу, б – зміна в часі діючого значення струму плеча підстанцій А та В; в – зміна в часі значення THD втрати напруги до 1 та 2 електровозу; г – зміна в часі значення THD струму плеча підстанцій А та В

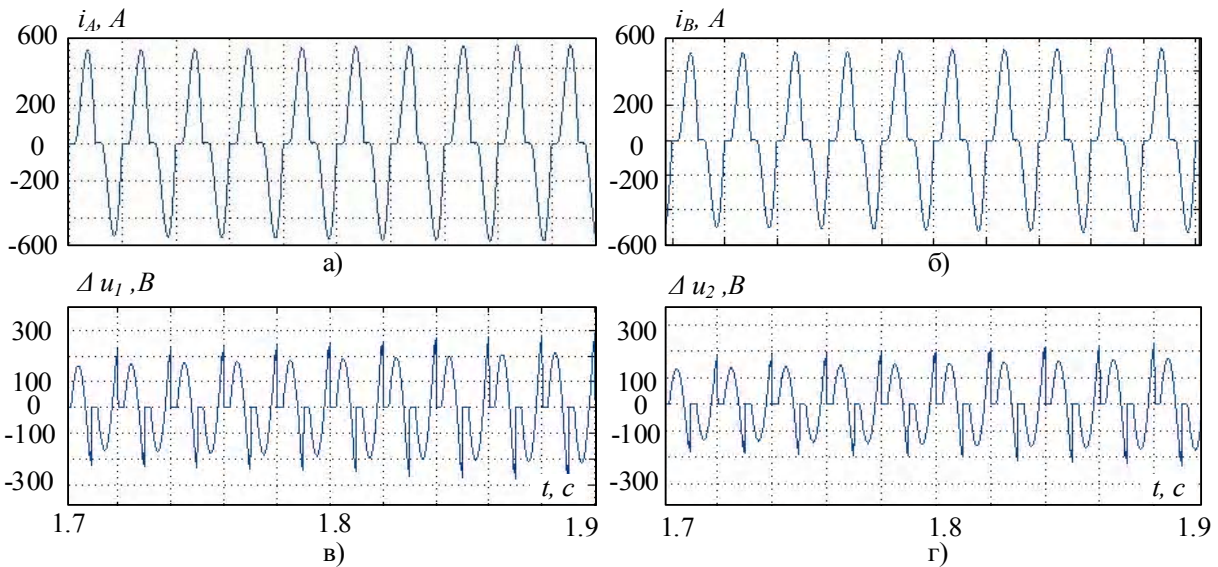


Рисунок 5 – Результати моделювання: а – зміна в часі миттєвого значення струму плеча підстанції А, б – зміна в часі миттєвого значення струму плеча підстанції; в – зміна в часі миттєвого значення втрати напруги до 1 електровозу, г – зміна в часі миттєвого значення втрати напруги до 2 електровозу

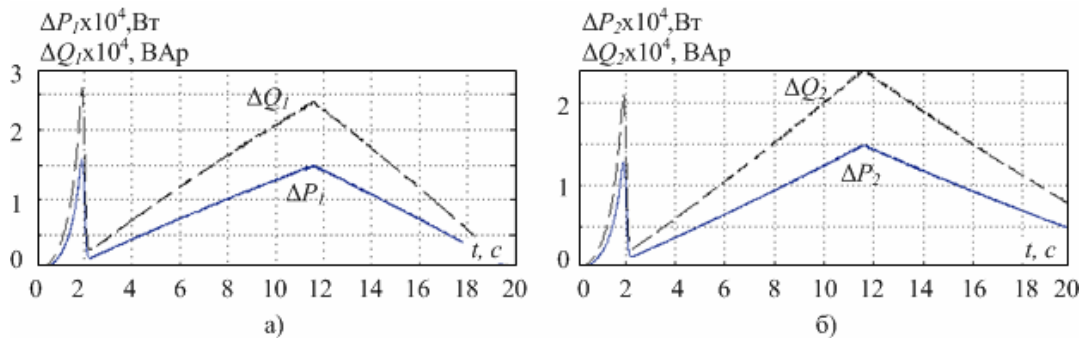


Рисунок 6 – Результати моделювання: а – зміна в часі значення втрати активної та реактивної потужності до 1 електровозу; б – зміна в часі значення втрати активної та реактивної потужності до 2 електровозу

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Побудована модель у комплексі з моделлю [5] відтворює роботу СТЕ, з початковими умовами розташування двох електровозів згідно з рисунком 1, аналогічні розрахунки, як показано в [1], можна виконати і для інших вихідних схем та кількості електровозів. Зважаючи на низьку інформативність розподілу параметрів в часі при однакових графіках руху електровозів, що встановлено за результатами попередніх досліджень, на рисунках 4–6 наведено розподіл досліджуваних параметрів у часі при вхідних параметрах моделювання, наведених на рисунку 3.

Адекватність математичної моделі підтверджується збігом форми графіків розподілу струму на фідерах тягових підстанцій та втрат напруги з аналогічними, наведеними у [1], з тією різницею, що перші отримані на підставі миттєвих значень рис. 3. додатково, для дослідження стають доступні показники несинусоїдальності струму (рис. 4. в, г) та напруги (рис. 4. в, г), а саме коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) струму та напруги та їх діючі значення (RMS), додатково враховуються вищі гармоніки струму та напруги (рис. 5), активних та реактивних складових втрат (рис. 6).

ВИСНОВКИ

1. Розроблена модель дозволяє проводити розрахунки миттєвих параметрів режиму системи тягового електропостачання при русі електровозів, та на відміну від існуючих робить це з дискретністю, зумовленою кроком розрахунку метода середі моделювання.

2. Враховується зміна режиму споживання електровозів від фідерів тягової підстанції за рахунок використання саме миттєвих параметрів.

3. Модель може бути використана для проектування тягових електрифікованих систем, планування графіків руху електровозів та контролю якості електричної енергії у тяговій мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бардушко В. Д., Ушаков В. А. Способ моделирования перемещения электровозов в межподстанционной зоне средствами Matlab / В. Д. Бардушко, В. А. Ушаков // Науч.-техн. журнал Известия Транссиба – 2014. Вып 4(20). – С. 10–18.
2. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
3. Міщенко Т. М. Перспектива схемотехнічних і моделювання підсистем електричної тяги при високоскоросному русі поїздів / Науковий журнал «Електротехніка та електроенергетика». Вип. 1 – Запоріжжя, 2014. – С. 19–28.
4. Слепцов М. А. Основы электрического транспорта: учебник для студ. Высш. учеб. заведений / М. А. Слепцов, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович и др. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 464с.
5. Сухоніс Т. Ю., Миколаєнко Ю. О., Бялобржеський О. В. Моделювання позаштатних режимів роботи системи інвертор-асинхронний двигун тягового електротехнічного комплексу двосистемного електровоза // Науково-технічний збірник. Гірнична електромеханіка та автоматика. Випуск 91. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 89–94.
6. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288с.:ил

Слободенюк Ю. А.¹, Бялобржеский А. В.²

¹Аспирант, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Украина

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА МГНОВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЭЛЕКТРОВОЗА

На основании анализа методов расчета электрических параметров режима систем тягового электро-снабжения выявленные недостатки связаны с дискретностью расчета и сложностями использования при несинусоидальных токах, собственно современным тяговым комплексам с полупроводниковыми преобразователями. Целью работы было создание непрерывной модели расчета мгновенных параметров системы электро-снабжения с расчетом параметров качества электроэнергии. С использованием методов теории электротехники разработана модель непрерывного расчета мгновенных параметров режима систем тягового электро-снабжения, отличается от тех, которые использовались ранее тем, что исходными данными является не средние значения, а предварительно определены мгновенные значения тока и скорости электровоза. Модель в отличие от рассматриваемых не имеет большой дискретности расчетов, что значительно повышает качество расчета при резком изменении между различными режимами работы электровозов и информативность при расчете показателей качества электроэнергии. Реализована возможность в непрерывном режиме для всего интервала моделирования на основании места расположения электровозов, которые движутся, рассчитывать распределение падения напряжения, потерь мощности и коэффициент несинусоидальности напряжения для каждого из электровозов в месте контакта.

Ключевые слова: Система тягового электро-снабжения, мгновенные параметры, график движения, параметры режима.

Slobodenjuk Yu.O.¹, Bialobrzheski O.V.²

¹Postgraduate Kremenchuk Myhailo Ostrohradskiy National University, Ukraine

²Candidate of Science, Associate Professor, Kremenchuk Myhailo Ostrohradskiy National University, Ukraine

MODEL CALCULATING THE INSTANTANEOUS MODE PARAMETER A TRACTION POWER SYSTEM MOVING ELECTRIC LOCOMOTIVES

Based on the methods of analysis for calculating the electrical parameters of the mode of the traction power supply systems identified deficiencies related to the readability of the calculation and use of non-sinusoidal currents difficulties in that peculiar modern traction complexes with semiconductor converters. Using the methods of electrical engineering theory developed a model for calculating a continuous instantaneous mode parameters of the traction power supply systems, is different from the calculation methods that have been used previously by the fact that the original data is not averages, and pre-defined instantaneous values of electric current and speed. The model, in contrast to these methods is not large discreteness calculations, which greatly improves the quality of the calculation of the sudden change between the different modes of operation of electric and informative value in the calculation of power quality. The possibility of continuous operation for the entire simulation interval based on the location of the place of electric locomotives that move count distribution of voltage drop, loss of power and non-sinusoidal voltage coefficient for each of the electric contacts in place.

Keywords: traction power supply system, the instantaneous parameters timetable, mode settings

REFERENCES

1. Bardushko V. D., Ushakov V. A. Sposob modelirovaniya peremeshheniya elektrovozov v mezhpodstancionnoj zone sredstvami Matlab. *Nauch.-texn. zhurnal Izvestiya Transsiba*, 2014. Vyp 4(20), pp. 10–18.
2. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyx zheleznyx dorog*. Moscow, Transport, 1982, 528 s.
3. Slepcev M. A., Dolaberidze G. P., Prokopovich A. V. *Osnovy elektricheskogo transporta: uchebnyk dlya stud. Vyssh. ucheb. zavedenij*, Moscow, Izdatelskij centr «Akademiya», 2006, 464 s.
4. Mishchenko T. M. Perspektiva skhemotekhnichnykh i modelyuvannya pidsystem elektrychnoyi tyahy pry vysokoskorosnomu rusi poyizdiv. *Naukovyy zhurnal «Elektrotehnika ta elektroenerhetyka»*, Vyp. 1, Zaporizhzhya, 2014, S. 19–28.
5. Sleptsov M. A., Dolaberidze G. P., Prokopovich A. V. *Osnovy elektricheskogo transporta: uchebnyk dlya stud. Vyssh. ucheb. Zavedeniy*. Moscow, Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2006, 464 s.
6. Suhonis T. Yu., Mikolaenko Yu. O., Bialobrzheskij O. V. Modelyuvannya pozashtatnix rezhimiv roboti sistemi invertor asinxronnij dvigun tyagovogo elektrotexnichnogo kompleksu dvosistemnogo elektrovoza. *Naukovo-tehnichnij zbirnik. Girnicha elektromexanika ta avtomatika*. V. 91, Dnipropetrovsk, 2013, S. 89–94.
7. Chernyh I. V. *Modelirovanie elektrotexnicheskix ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystem i Simulink*. Moscow, DMK Press; SPb, Piter, 2008, 288 s.