

Д. О. БОСИЙ (ДНУЗТ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua)

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ МИТТЄВИХ СХЕМ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ СПОЖИВАННЯ ПОСТІЙНОЇ ПОТУЖНОСТІ

### Вступ

Нестационарний характер електричних навантажень, який створюється електрорухомим складом в системі електропостачання, та їх здатність переміщуватись у просторі відносно тягових підстанцій призводять до залежності напруги і споживання струму від характеру руху поїздів та особливостей електрифікованої ділянки. Напруга безпосередньо на струмоприймачах електровозів коливається в досить широких межах, що примушує враховувати зміни режиму напруги через дві основні причини.

По-перше, швидкість електровозів з тяговими двигунами послідовного збудження при фіксованій силі тяги і позиції регулювання змінюється практично пропорційно, що в результаті впливає на виконання графіку руху поїздів.

По-друге, розрахунок режимів системи тягового електропостачання, який базується на даних тягових розрахунків, вимагає тісного ув'язування процесів розподілу та споживання електричної енергії.

Взаємодія електрорухомого складу з системою тягового електропостачання є досить складним процесом, який проявляється в тому, що змінюється як координата, так і швидкість руху поїзда. В свою чергу, струми залежать від швидкості руху і отриману таким чином миттєву схему можна розрахувати, але застосувати результати розрахунку до процесу руху поїзда не можна через неможливість зарані передбачити зміни швидкості, координати та профілю, що входять до цієї ж системи диференціальних рівнянь руху поїздів.

Складність та важливість описаної задачі підтверджується великою кількістю методів, які створені у різні часи для її вирішення [1]. Умовно розроблені методи розділяються на три групи.

Перша група методів (автори М. М. Костромітін, О. Б. Лебедев, Л. Г. Абелішвілі, Г. Г. Марквардт) розрахована на визначення не миттєвих, а усереднених величин.

У другій групі методів (автори В. А. Тимофеев, Б. Кузнецов) необхідне уточнення досяга-

ється послідовними наближеннями, перше з яких виконується з врахуванням тільки спаду напруги до розрахункового поїзду, або цього ж спаду, помноженого на коефіцієнт, який наближено враховує вплив супутніх поїздів.

Третя група методів ґрунтується на ідеї одночасного розрахунку всіх навантажень (автори В. А. Кісляков, Б. А. Бесков).

З розвитком електронно-обчислювальної техніки подальшого поширення здобули метод послідовних наближень (розроблений М. Я. Пузановим) та метод одночасного моделювання (впроваджений М. Б. Улановським).

У методі послідовних наближень ув'язування неперервних змін напруги, швидкості і сили тяги одного електровозу та врахування взаємного впливу струмів інших поїздів відбувається повторними перерахунками. Для зменшення їх кількості використані деякі методи прискорення збіжності.

У методі одночасного розрахунку зміна координат, швидкостей і струмів усіх електровозів враховується одразу, для чого питомі прискорюючі та гальмівні сили уведені до формул рішення рівнянь руху разом зі своїми похідними. Останні отримуються диференціюванням для випадку неперервної зміни змінних і прогнозуванням на середину наступного кроку.

Обидва методи принципово придатні для будь-якого роду струму, але історично так склалось, що метод послідовних наближень застосовувався для постійного, а метод одночасного розрахунку – для змінного струму.

У всіх розглянутих методах тягове навантаження прийнято замінювати джерелом ідеального струму. Таке припущення спрощує електричні розрахунки миттєвих схем, оскільки задача зводиться до розрахунку струморозподілу за заданими величинами струмів та наступні розрахунки напруги на підставі заданої е.р.с. на шинах тягових підстанцій. На підставі такого підходу досить просто розраховуються відомі класичні залежності зміни струмів фідерів та

напруги на струмоприймачі електровозу для різних схем живлення [2].

Врахування взаємозв'язку напруги на струмоприймачі електровозу і характеристик електрорухомого складу актуальне для випадків, коли система управління самого електрорухомого складу не передбачає стабілізації тягової потужності [3, 4]. Це стосується усього електрорухомого складу постійного і однофазно-постійного струму з колекторними тяговими двигунами, що експлуатуються на залізницях України.

Розвиток сучасної елементної бази дозволяє побудувати потужні одиниці електрорухомого складу, система управління яких дозволяє стабілізувати значення тягової потужності. В такому випадку зміна режиму напруги на струмоприймачі за інших рівних умов руху призведе лише до зміни складових первинного струму електровозу, що в свою чергу, вплине на витрати електроенергії, ККД та коефіцієнт потужності електрорухомого складу без впливу на тягово-енергетичні характеристики [4].

У підтвердження тому виступають і сучасні дослідження з розробки керованого електропостачання на електрифікованих залізницях постійного струму [5]. В них, зокрема вказується, що збільшення середньої напруги на струмоприймачі електровозу на 20 % призводить до зниження середнього струму електровозу на 9-17 %, і зниження втрат електроенергії в тяговій мережі на 2 % у відношенні до витрат електричної енергії тяговими двигунами.

На підставі вищевикладеного зрозуміло, що розрахунки систем тягового електропостачання, які виконувались з припущенням того, що реалізована електрорухомим складом потужність визначається лише значенням струму при номінальній напрузі, підлягають уточненню. Крім цього, експлуатація одночасно і сучасного і наявного електрорухомого складу призводить до погіршення умов роботи останнього в частині впливу режиму напруги на тягово-енергетичні характеристики.

### Постановка задачі

Метою даної роботи є розробка методики розрахунку миттєвих схем, яка дозволить виконувати електричні розрахунки системи тягового електропостачання на підставі вихідної потужності електрорухомого складу, враховуючи можливість її постійного споживання при переміщенні тягового навантаження у просторі.

Для досягнення поставленої мети дослідимо закономірності зміни параметрів електроенергетичних процесів для відомих схем живлення контактної мережі взявши за основу баланс потуж-

ностей для кожної миттєвої схеми. З огляду на простоту розрахунків консольної схеми живлення та її неспроможність забезпечити номінальний режим напруги при збільшених навантаженнях, теоретичні викладки для неї не приводяться.

### Основна частина

Розглянемо баланс потужностей для двосторонньої схеми постійного струму за умови прослідкування одного електрорухомого навантаження з постійною споживаною потужністю  $P$  (рис. 1). Для спрощення подальших викладок поточну координату розташування навантаження  $x(t)$  позначатимемо як  $x$ , пам'ятаючи про її залежність від часу  $t$ .

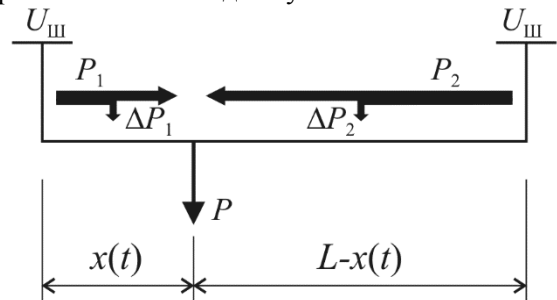


Рис. 1. Розрахункова схема для двосторонньої схеми живлення

Напругу на шинах тягових підстанцій вважатимемо постійною і рівною для двох суміжних підстанцій. Тоді для будь-якого моменту часу для заданих умов, справедлива рівність

$$P = P_1 - \Delta P_1 + P_2 - \Delta P_2, \quad (1)$$

де  $P_1, P_2$  – потужності, які віддаються першою та другою підстанціями;

$\Delta P_1, \Delta P_2$  – втрати потужності в тяговій мережі, які виникають при передачі основної потужності  $P$ .

Нехай в деякий момент часу струм електровозу матиме значення  $I$ , а напруга на струмоприймачі –  $U$ , тобто споживана електровозом потужність  $P = U \cdot I$ . Інші складові балансу потужностей для цього моменту часу матимуть вигляд

$$P = U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot x \cdot I_1^2 + U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - x) \cdot I_2^2, \quad (2)$$

де  $I_1, I_2$  – струми фідерів відповідно першої та другої підстанції;

$U_{\text{ш}}$  – напруга на шинах тягової підстанції;

$r_0$  – питомий опір тягової мережі;

$x$  – поточна координата розташування навантаження;

$L$  – довжина міжпідстанційної зони.

Використовуючи відомі формули струмо-розподілу для двосторонньої схеми, отримаємо

$$P = U_{\text{ш}} I \frac{L-x}{L} - r_0 \cdot x \cdot I^2 \frac{(L-x)^2}{L^2} + \\ + U_{\text{ш}} I \frac{x}{L} - r_0 \cdot (L-x) \cdot I^2 \frac{x^2}{L^2}. \quad (3)$$

Спростуючи рівняння та групуємо величини відносно невідомої  $I$ , отримаємо рівняння

$$P = U_{\text{ш}} I - r_0 \left( x - \frac{x^2}{L} \right) I^2. \quad (4)$$

Таким чином, з останнього виразу видно, що споживана електровозом потужність має дві складові: перша з них визначається добутком струму та номінальної напруги (у випадку розташування поблизу шин тягової підстанції), а друга визначає втрати потужності при її передачі від шин тягової підстанції до будь-якої точки тягової мережі. В загальному випадку можна стверджувати, що при необхідності споживання заданої потужності в довільній точці тягової мережі струм електровоза буде збільшуватись на величину, що визначає необхідні для передачі цієї потужності втрати, відносно струму, визначеного для номінальної напруги.

Для більшої зручності подальших викладок введемо поняття функції опору

$$f(x) = r_0 \left( x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (5)$$

яка фізично визначає закономірність зміни опору для даної схеми живлення.

Переписавши рівняння (4) з врахуванням (5) та вирішивши його відносно струму, відкидаючи корінь рівняння, який не має фізичного сенсу, матимемо

$$P = U_{\text{ш}} I - f(x) I^2, \quad (6)$$

$$I = \frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4f(x)P}}{2f(x)}. \quad (7)$$

Фактично, чисельник виразу (7) визначає падіння напруги, яке створюється при споживанні заданої потужності в будь-якій точці тягової мережі. У порівнянні з традиційним методом роз-

рахунку, де потужність задається струмом для номінальної напруги, на практиці можуть мати місце суттєві відмінності тягових струмів в залежності від фактичних значень напруги.

Проаналізуємо, як зміняться електричні розрахунки для даної схеми живлення при прослідкуванні одного поїзду, який в одному випадку задається постійним струмом для номінальної напруги, а в другому – постійною потужністю. Розрахунки проведемо для типової ділянки постійного струму довжиною 20 км, з питомим опором тягової мережі 0,05 Ом/км та середньою швидкістю руху 60 км/год. Напругу на шинах обох тягових підстанцій вважатимемо рівною 3,3 кВ а внутрішніми опорами підстанцій знехтуємо.

В результаті розрахунків отримаємо наступні сімейства кривих струмів парних (рис. 2, а) та непарних фідерів (рис. 2, б) відносно трьох значень потужностей, а саме 3.3 МВт, 6.0 МВт і 8.0 МВт відповідно. Аналогічно розрахункам струмів фідерів, виконані розрахунки напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 3) для вказаних потужностей.

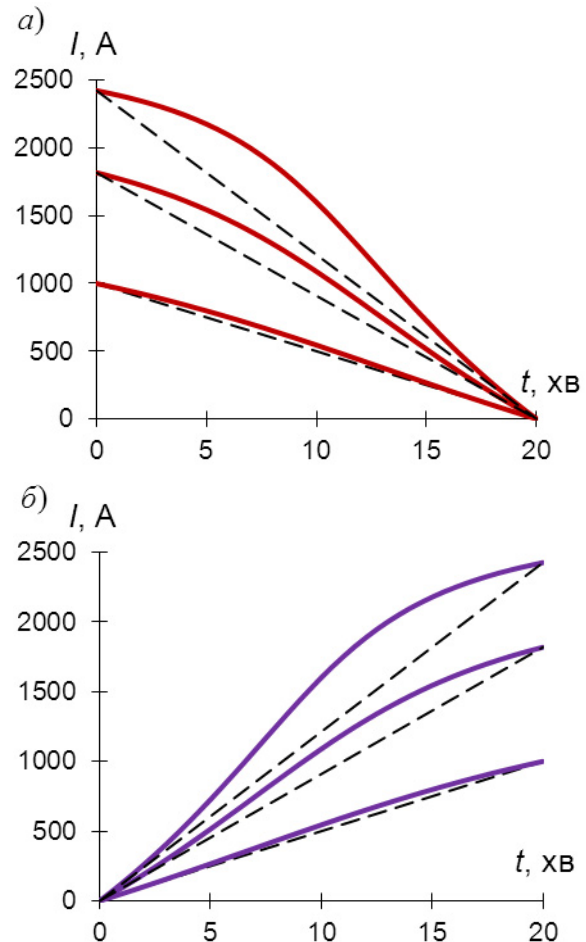


Рис. 2. Сімейства струмів фідерів двосторонньої схеми живлення за двома методами розрахунку

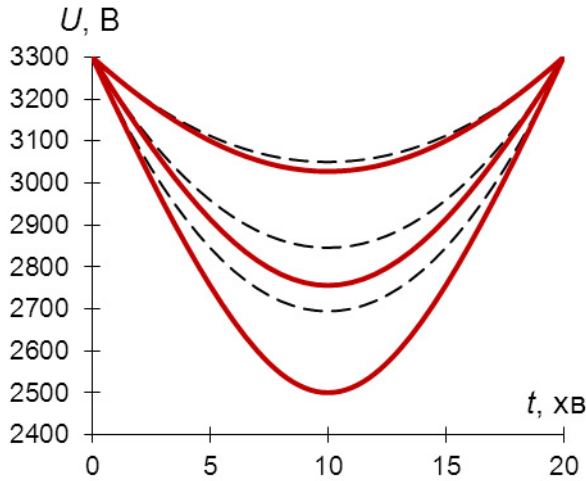


Рис. 3. Залежності напруги на струмоприймачі електровозу для двосторонньої схеми, визначені різними методами

Як видно з аналізу приведених залежностей, максимальні відмінності розрахункових величин спостерігаються всередині міжпідстанційної зони, при чому зі збільшенням потужності їх відносні значення збільшуються.

Для вузлової схеми живлення з виконанням поставлених умов структура балансу потужностей дещо ускладниться. Через можливість дзеркального відтворення, при узагальненні достатньо розглянути розташування навантаження на будь-якій колії між підстанцією та постом секціонування (рис. 4).

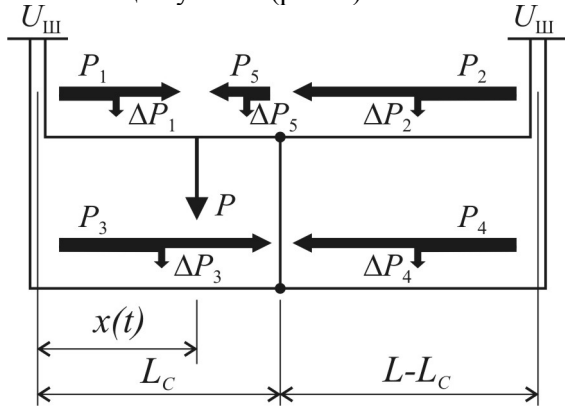


Рис. 4. Розрахункова схема для вузлової схеми живлення

Отже, для будь-якого моменту часу, справедлива рівність

$$P = P_1 - \Delta P_1 + P_5 - \Delta P_5, \quad (8)$$

де, в свою чергу,

$$P_5 = P_2 - \Delta P_2 + P_3 - \Delta P_3 + P_4 - \Delta P_4. \quad (9)$$

Приймаючи споживану електровозом потужність  $P = U \cdot I$ , визначимо інші складові балансу потужностей для цього моменту часу:

$$P_1 - \Delta P_1 = U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot x \cdot I_1^2;$$

$$P_2 - \Delta P_2 = U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_2^2;$$

$$P_3 - \Delta P_3 = U_{\text{ш}} I_3 - r_0 \cdot L_C \cdot I_3^2;$$

$$P_4 - \Delta P_4 = U_{\text{ш}} I_4 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_4^2;$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (L_C - x) \cdot (I_2 + I_3 + I_4)^2,$$

де  $I_1, I_2, I_3, I_4$  – струми фідерів відповідно першої (1, 3) та другої (2, 4) підстанції.

Використовуючи формули розподілу струмів для вузлової схеми живлення, матимемо

$$P_1 - \Delta P_1 = U_{\text{ш}} I \left( 1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} \cdot x \right) - r_0 \cdot x \cdot I^2 \cdot \left( 1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} \cdot x \right)^2;$$

$$P_2 - \Delta P_2 = U_{\text{ш}} I \frac{x}{2L} - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I^2 \left( \frac{x}{2L} \right)^2;$$

$$P_3 - \Delta P_3 = U_{\text{ш}} I \left( \frac{L - L_C}{2LL_C} \cdot x \right) - r_0 \cdot L_C \cdot I^2 \left( \frac{L - L_C}{2LL_C} \cdot x \right)^2;$$

$$P_4 - \Delta P_4 = U_{\text{ш}} I \frac{x}{2L} - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I^2 \left( \frac{x}{2L} \right)^2;$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (L_C - x) \cdot I^2 \left( \frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_C} \right)^2.$$

Користуючись (9), визначимо по-черзі складові рівняння (8), а саме

$$P_1 + P_5 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = U_{\text{ш}} I \times \left( 1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} x + \frac{x}{2L} + \frac{L - L_C}{2LL_C} x + \frac{x}{2L} \right) = U_{\text{ш}} I;$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_5 = r_0 I^2 \times \left[ x \left( 1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} x \right)^2 + (L - L_C) \left( \frac{x}{2L} \right)^2 + \right]$$

$$+L_C \left( \frac{L-L_C}{2LL_C} x \right)^2 + (L-L_C) \left( \frac{x}{2L} \right)^2 + \\ + (L_C - x) \left( \frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_C} \right)^2 \Bigg].$$

Спрощуючи вираз у дужках, отримаємо

$$\Delta P_1 + \Delta P_5' = r_0 I^2 \left[ x - \left( \frac{L+L_C}{2LL_C} \right) x^2 \right].$$

Таким чином, повертаючись до рівняння (8), матимемо

$$P = U_{ш} I - r_0 I^2 \left[ x - \left( \frac{L+L_C}{2LL_C} \right) x^2 \right].$$

Виконавши заміну виразу у дужках на функцію опору  $f(x)$ , матимемо отримане раніше рівняння (6) та аналогічний виразу (7) розв'язок.

У випадку знаходження поїзду за постом секціонування, зміниться структура функції опору  $f(x)$  тягової мережі таким чином, що в загальному вигляді будемо мати

$$f(x) = r_0 \times \begin{cases} x - \left( \frac{L+L_C}{2LL_C} \right) x^2, & 0 \leq x \leq L_C; \\ \frac{L \left( x - \frac{L_C}{2} \right)}{L-L_C} - \frac{\left( L - \frac{L_C}{2} \right) x^2}{L(L-L_C)}, & L_C \leq x \leq L. \end{cases}$$

За результатами розрахунків для вузлової схеми живлення і прийнятих на початку потужностей, можна отримати наступні сімейства струмів парних (рис. 5, а) та непарних фідерів (рис. 5, б). Аналогічним чином отримані залежності напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 6) для вказаних потужностей.

Як видно з приведених залежностей, для вузлової схеми живлення максимальні відмінності розрахункових величин спостерігаються не в середині міжпідстанційної зони, а зміщені на 1/3 відносно координати поста секціонування.

Паралельна схема живлення матиме ще більше ускладнену структуру розподілу потужностей. Для досягнення поставленого завдання необхідно розглянути два випадки розташування навантаження відносно пунктів паралельного з'єднання контактних підвісок та поста секціонування. Знову ж таки, дивлячись на поздовжню симетричність та можливість дзеркаль-

ного відтворення схеми, достатньо розглянути випадки знаходження навантаження до першого пункту та між першим пунктом і постом секціонування (рис. 7).

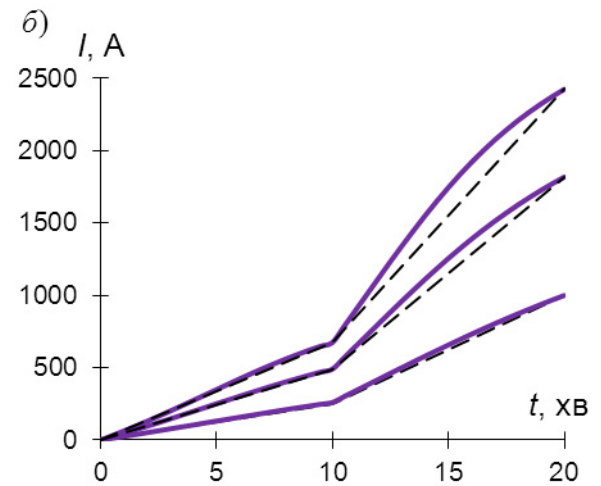
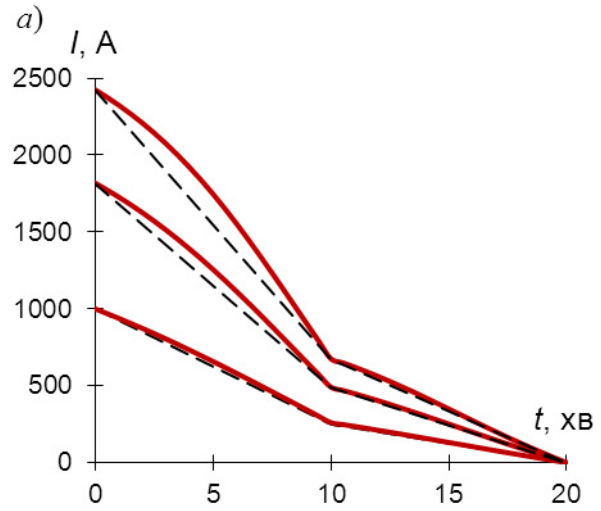


Рис. 5. Сімейства струмів попутних фідерів вузлової схеми живлення за двома методами розрахунку

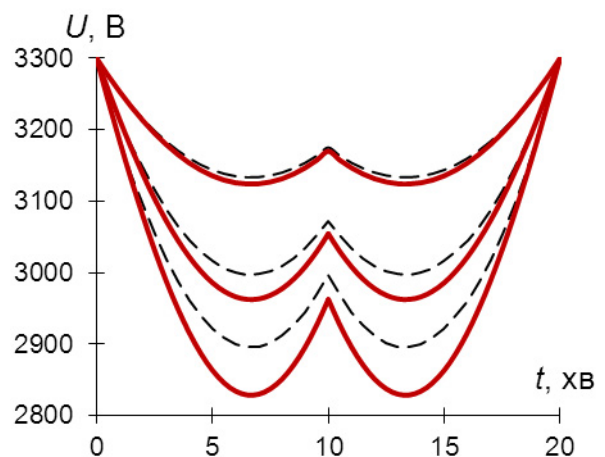


Рис. 6. Залежності напруги на струмоприймачі електровозу для вузлової схеми, визначені двома методами

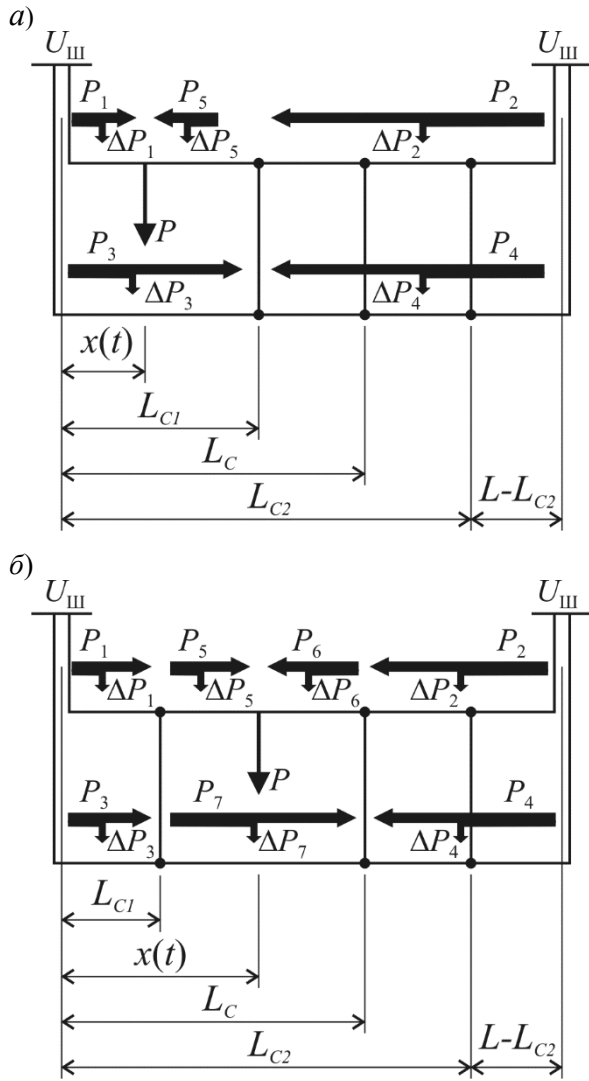


Рис. 7. Розрахункові схеми для паралельної схеми живлення

Таким чином, для першого випадку (рис. 7, а) в кожен момент часу справедлива рівність

$$P = P_1 - \Delta P_1 + P_5 - \Delta P_5, \quad (10)$$

де

$$P_5 = P_2 - \Delta P_2 + P_3 - \Delta P_3 + P_4 - \Delta P_4. \quad (11)$$

Вважаючи, що споживана електровозом потужність визначається як  $P = U \cdot I$ , визначимо інші складові балансу потужностей для цього моменту часу:

$$\begin{aligned} P_1 - \Delta P_1 &= U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot x \cdot I_1^2; \\ P_2 - \Delta P_2 &= U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I_2^2; \\ P_3 - \Delta P_3 &= U_{\text{ш}} I_3 - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_3^2; \\ P_4 - \Delta P_4 &= U_{\text{ш}} I_4 - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I_4^2; \\ \Delta P_5 &= r_0 \cdot (L_{C1} - x) \cdot (I_2 + I_3 + I_4)^2, \end{aligned}$$

де  $I_1, I_2, I_3, I_4$  – струми фідерів відповідно першої (1, 3) та другої (2, 4) підстанції.

Беручи за основу формули розподілу струмів для вузлової схеми живлення та відповідно змінюючи їх до паралельної, матимемо

$$\begin{aligned} P_1 - \Delta P_1 &= U_{\text{ш}} I \left( 1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right) - \\ &\quad - r_0 \cdot x \cdot I^2 \cdot \left( 1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 - \Delta P_2 &= U_{\text{ш}} I \frac{x}{2L} - \\ &\quad - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I^2 \left( \frac{x}{2L} \right)^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_3 - \Delta P_3 &= U_{\text{ш}} I \left( \frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right) - \\ &\quad - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I^2 \left( \frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_4 - \Delta P_4 &= U_{\text{ш}} I \frac{x}{2L} - \\ &\quad - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I^2 \left( \frac{x}{2L} \right)^2; \end{aligned}$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (L_{C1} - x) \cdot I^2 \left( \frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_{C1}} \right)^2.$$

Користуючись (11), визначимо по-черзі складові рівняння (10), а саме

$$\begin{aligned} P_1 + P_5 &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = \\ &= U_{\text{ш}} I \left( 1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} x + \frac{x}{2L} + \frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} x + \frac{x}{2L} \right) = \\ &= U_{\text{ш}} I; \\ \Delta P_1 + \Delta P_5' &= r_0 I^2 \times \\ &\times \left[ x \cdot \left( 1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2 + (L - L_{C1}) \cdot \left( \frac{x}{2L} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + L_{C1} \cdot \left( \frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2 + (L - L_{C1}) \cdot \left( \frac{x}{2L} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + (L_{C1} - x) \cdot \left( \frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_{C1}} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

Спрощуючи вираз у дужках, отримаємо

$$\Delta P_1 + \Delta P_5' = r_0 I^2 \times \\ \times \left[ x - x^2 \left( \frac{1}{L} + \frac{3}{4L_{C1}} - \frac{L_{C1}}{4L_C^2} - \frac{L_{C1}}{2LL_C} \right) - \right. \\ \left. - x^3 \left( \frac{1}{4L_C^2} - \frac{1}{4L_{C1}^2} + \frac{1}{2LL_C} - \frac{1}{2LL_{C1}} \right) \right].$$

Тобто, функція опору для паралельної схеми живлення при знаходженні навантаження між першою підстанцією та пунктом паралельного з'єднання підвісок матиме вигляд

$$f(x) = r_0 \left[ x - x^2 \left( \frac{1}{L} + \frac{3}{4L_{C1}} - \frac{L_{C1}}{4L_C^2} - \frac{L_{C1}}{2LL_C} \right) - \right. \\ \left. - x^3 \left( \frac{1}{4L_C^2} - \frac{1}{4L_{C1}^2} + \frac{1}{2LL_C} - \frac{1}{2LL_{C1}} \right) \right].$$

При переміщенні навантаження за перший пункт паралельного з'єднання підвісок зміниться структура розподілу потужностей (рис. 7, б). Тому переписемо баланс потужностей та структуру його складових, а саме

$$P = P_5 - \Delta P_5 + P_6 - \Delta P_6, \quad (12)$$

де

$$P_5 = P_1 - \Delta P_1 + P_3 - \Delta P_3 - P_7; \quad (13)$$

$$P_6 = P_2 - \Delta P_2 + P_4 - \Delta P_4 + P_7 - \Delta P_7. \quad (14)$$

Пам'ятаючи, що споживана електровозом потужність визначається як  $P = U \cdot I$ , визначимо інші складові балансу потужностей для цього моменту часу:

$$P_1 - \Delta P_1 = U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_1^2; \\ P_2 - \Delta P_2 = U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_2^2; \\ P_3 - \Delta P_3 = U_{\text{ш}} I_3 - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_3^2; \\ P_4 - \Delta P_4 = U_{\text{ш}} I_4 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_4^2; \\ \Delta P_5 = r_0 \cdot (x - L_{C1}) \cdot I_5^2; \\ \Delta P_6 = r_0 \cdot (L_C - x) \cdot I_6^2; \\ \Delta P_7 = r_0 \cdot (L_C - L_{C1}) \cdot I_7^2; \\ P_7 = U_{C1} I_7; U_{C1} = U_{\text{ш}} - I_1 \cdot r_0 \cdot L_{C1}.$$

В свою чергу,

$$I_1 = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) I; \quad I_3 = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) I;$$

$$I_2 = \frac{x}{2L} I; \quad I_4 = \frac{x}{2L} I;$$

$$I_7 = (I_1 + I_3) \frac{x - L_{C1}}{2(L_C - L_{C1})} -$$

$$- (I_2 + I_4) \frac{L_C - x}{2(L_C - L_{C1})};$$

$$I_5 = (I_1 + I_3) \frac{2L_C - L_{C1} - x}{2(L_C - L_{C1})};$$

$$I_6 = (I_2 + I_4) \frac{L_C - 2L_{C1} + x}{2(L_C - L_{C1})}.$$

Використовуючи (13), визначимо по-черзі складові рівняння (12), а саме

$$P_5 + P_6 = U_{\text{ш}} I_1 + U_{\text{ш}} I_3 - U_{C1} I_7 + \\ + U_{\text{ш}} I_2 + U_{\text{ш}} I_4 + U_{C1} I_7.$$

На підставі формул струмозподілу можна перетворити отримане рівняння наступним чином

$$P_5 + P_6 = \\ = U_{\text{ш}} I \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{x}{2L} + \frac{x}{2L} \right] = \\ = U_{\text{ш}} I.$$

$$\Delta P_5' + \Delta P_6' = \Delta P_1 + \Delta P_3 + \Delta P_5 + \\ + \Delta P_2 + \Delta P_4 + \Delta P_6 + \Delta P_7.$$

$$\Delta P_5' + \Delta P_6' = r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_1^2 + r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_3^2 + \\ + r_0 \cdot (x - L_{C1}) \cdot I_5^2 + r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_2^2 + \\ + r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_4^2 + r_0 \cdot (L_C - x) \cdot I_6^2 + \\ + r_0 \cdot (L_C - L_{C1}) \cdot I_7^2.$$

$$\Delta P_5' + \Delta P_6' = r_0 \cdot L_{C1} \cdot \left( \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) I \right)^2 + \\ r_0 \cdot L_{C1} \cdot \left( \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) I \right)^2 + r_0 \cdot (x - L_{C1}) \times \\ \times \left( \left( \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) I + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) I \right) \frac{2L_C - L_{C1} - x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 + \\ + r_0 \cdot (L - L_C) \cdot \left( \frac{x}{2L} I \right)^2 + r_0 \cdot (L - L_C) \cdot \left( \frac{x}{2L} I \right)^2 + \\ + r_0 \cdot (L_C - x) \cdot \left( \left( \frac{x}{2L} I + \frac{x}{2L} I \right) \frac{L_C - 2L_{C1} + x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 + \\ + r_0 (L_C - L_{C1}) \left[ \left( \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \right) \times \right.$$

$$\times \left[ \frac{x - L_{C1}}{2(L_C - L_{C1})} - \left( \frac{x}{2L} I + \frac{x}{2L} I \right) \frac{L_C - x}{2(L_C - L_{C1})} \right]^2 \cdot$$

$$\Delta P_5' + \Delta P_6' = r_0 \cdot I^2 \left[ L_{C1} \cdot \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{L} \right)^2 + (x - L_{C1}) \times \right.$$

$$\times \left( 1 - \frac{x}{L} \right)^2 \left( \frac{2L_C - L_{C1} - x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 + 2(L - L_C) \cdot \left( \frac{x}{2L} \right)^2 +$$

$$+ (L_C - x) \cdot \left( \frac{x}{L} \right)^2 \left( \frac{L_C - 2L_{C1} + x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 + (L_C - L_{C1}) \times$$

$$\times \left. \left( \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \frac{x - L_{C1}}{2(L_C - L_{C1})} - \frac{x}{L} \cdot \frac{L_C - x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 \right].$$

В результаті, остаточно отримаємо

$$f(x) = r_0 \times \left\{ \begin{array}{ll} x - \frac{x^2}{2L} - \frac{x^2}{2L_{C1}}, & 0 \leq x \leq L_{C1}; \\ -\frac{x^2 - 2L_C x + L_C L_{C1}}{2L_C - 2L_{C1}} - \frac{L_C x^2 - L_{C1} x^2}{2L(L_C - L_{C1})}, & L_{C1} \leq x \leq L_C; \\ \frac{x^2 - 2L_{C2} x + L_C L_{C2}}{2L_C - 2L_{C2}} - \frac{L_C x^2 - L_{C2} x^2}{2L(L_C - L_{C2})}, & L_C \leq x \leq L_{C2}; \\ -\frac{(L - x) \cdot (L L_{C2} - 2Lx + L_{C2} x)}{2L(L - L_{C2})}, & L_{C2} \leq x \leq L. \end{array} \right.$$

За результатами розрахунків паралельної схеми живлення для прийнятих умов отримані наступні сімейства струмів парних (рис. 8, а) та непарних фідерів (рис. 8, б). Подібним чином отримані залежності напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 9).

Виконаємо перевірку відповідності балансу електричної енергії для прийнятих вихідних даних і потужності споживання електровозом на рівні 3,3 МВт. Для чого обчислимо фактичну потужність, спожиту електровозом, як добуток напруги на струмоприймачі та струму для кожної схеми живлення, а за отриманими формулами функцій опору  $f(x)$  – втрати потужності в контактній мережі, як добуток квадрату струму електровозу на відповідну функцію опору, тобто

$$\Delta P = I^2 \cdot f(x). \quad (15)$$

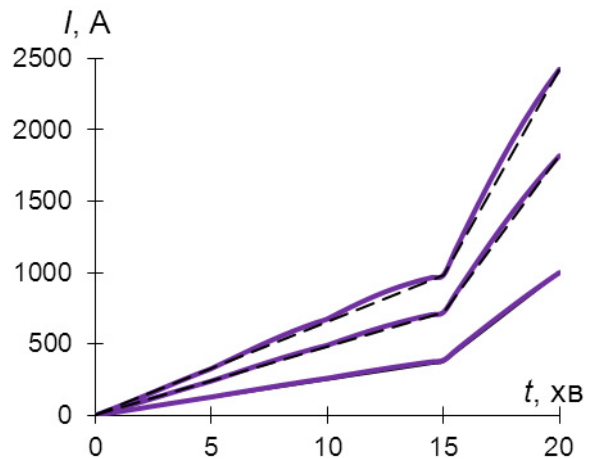
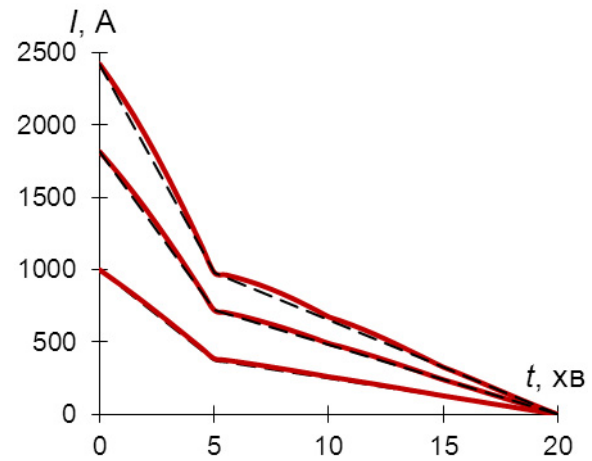


Рис. 8. Сімейства струмів попутних фідерів паралельної схеми живлення за двома методами розрахунку

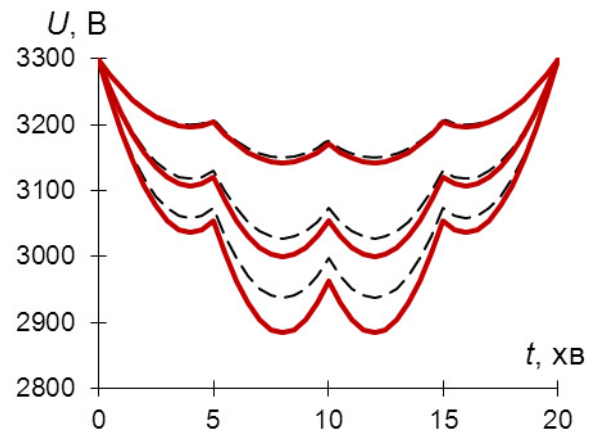


Рис. 9. Залежності напруги на струмоприймачі електровозу для паралельної схеми, визначені двома методами

Як видно з рис. 10, потужність електровозу для кожного моменту часу виходить постійною, а змінюються лише втрати в залежності від схеми живлення. При цьому, постійність потужності забезпечується збільшенням споживаного електровозом струму з врахуванням фактичного зниження напруги на струмоприймачеві.

Таким чином, значення потужності 3,3 МВт за класичного підходу до розрахунку миттєвих схем відповідає випадку, коли напруга на струмоприймачеві підтримується за допомогою стороннього джерела потужності на рівні 3,3 кВ при споживанні струму в 1000 А.

Насправді, система підтримання постійної потужності сучасного електрорухомого складу збільшуватиме первинний струм електровозу на величину покриття втрат в системі електропостачання, які в загальному випадку залежать від багатьох факторів, а для прийнятих для наочності припущень, повторюватимуть форму відомих залежностей втрат потужності для різних схем живлення (рис. 11).

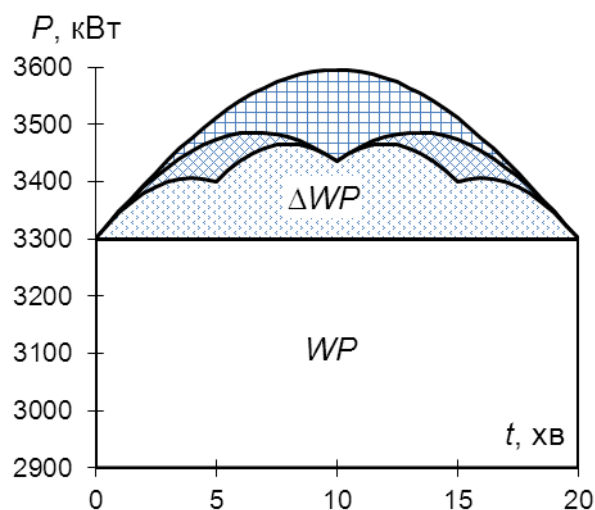


Рис. 10. Складові балансу електричної енергії для різних схем живлення

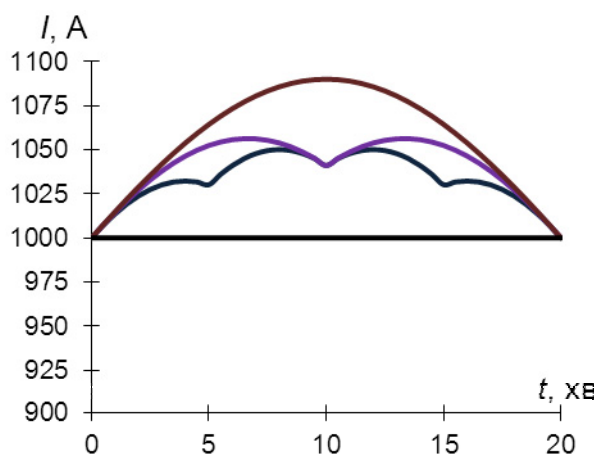


Рис. 11. Струм електровозу для різних схем живлення за умови споживання заданої потужності

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Решение задач энергоснабжения на электронных машинах [Текст] / Р. И. Мирошниченко, Н. Я. Пузанов, М. Б. Улановский, Д. А. Палей, М. С. Гочуа. – М.: Транспорт, 1971. – 168 с.

Другими словами, розроблена методика розрахунку миттєвих схем дозволяє визначити у будь-який момент часу для заданої схеми живлення такий струм електровозу, що відповідало б споживанню необхідної потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачі електровозу.

#### Висновки

Заміна тягового навантаження джерелом ідеального струму для розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання вносить суттєву похибку в розрахунки струмів фідерів, напруги на струмоприймачеві та втрати потужності. Похибка збільшується зі збільшенням потужності, що реалізується електрорухомим складом. Внаслідок того, що при проектуванні системи електропостачання це явище не враховувалось, погіршуються тягового-енергетичні характеристики існуючого електрорухомого складу при одночасній експлуатації з сучасним, системи управління якого дозволяють стабілізувати значення тягової потужності.

На підставі балансу та розподілу потужностей для різних схем живлення контактної мережі в аналітичному виді отримані функції опору, які фізично визначають закономірність зміни опору тягової мережі відносно рухомого тягового навантаження.

Запропонована методика розрахунку миттєвих схем з використанням аналітичних функцій опору дозволяє виконати електричні розрахунки системи тягового електропостачання при споживанні електрорухомим складом заданої потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачеві.

Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин за допомогою наведеної методики та аналітичні вирази отриманих для різних схем живлення контактної мережі функцій опору дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

#### REFERENCES

1. Miroshnichenko R. I., Puzanov N. Ya., Ulanovskiy M. B., Paley D. A., Gochua M. S. *Reshenie zadach energosnabzheniya na elektronnykh mashinakh* [Meeting the challenges of energy supply to the electron-

2. Босий, Д. О. Імітаційне моделювання системи тягового електропостачання для дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях змінного струму [Текст] / Д. О. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2008. - Вип. 24. - С. 49-54.

3. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. - Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. - Т. 1. - 456 с.

4. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. - Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. - Т. 2. - 364 с.

5. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока [Текст] / Б. А. Аржанников. - Екатеринбург: УрГУПС, 2010. - 176 с.

6. Сиченко, В. Г. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2009. - Вип. 29. - С. 82-87.

7. Сиченко В. Г. Voltage quality on traction load buses of DC substations / В. Г. Сиченко // Електрифікація транспорту. - 2013. - № 6. - С. 58-63.

8. Сиченко, В. Г. Моделювання електромагнітних процесів у тяговій мережі постійного струму / В. Г. Сиченко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2011. - Вип. 38. - С. 110-113.

Надійшла до друку 27.11.2014.

**Ключові слова:** система електропостачання, електрична тяга, миттєва схема, баланс, розподіл, постійна потужність, функція опору, режими напруги.

ic machines]. Moscow, Transport Publ., 1971. 168 p.

2. Bosiy D. O. Imitatsiynе modelyuvannya systemy tyahovoho elektropostachannya dlya doslidzhennya pokaznykiv yakosti elektrychnoyi enerhiyi na tyahovykh pidstantsiyakh zminnoho strumu [Simulation the Traction Power Supply System for research of quality indices of electricity for AC traction substations]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 24, pp. 49-54.

3. Get'man G. K. *Teoriya elektricheskoy tyagi. T. 1* [The theory of electric traction. Vol 1]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2011. 456 p.

4. Get'man G. K. *Teoriya elektricheskoy tyagi. T. 2* [The theory of electric traction. Vol 2]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2011. 364 p.

5. Arzhannikov B. A. *Sistema upravlyаемого elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo toka* [System-managed power supply of DC electrified railways]. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 2010. 176 p.

6. Sychenko V. H., Bosiy D. O. Analiz rezhymiv napruhy na pryednannyakh tyahovykh pidstantsiy zminnoho strumu [Analysis the modes of voltage on the connections for AC traction substations]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 29, pp. 82-87.

7. Sychenko V. H. Voltage quality on traction load buses of DC substations. *Elektryfikatsiya transport - Electrification of transport*, 2013, issue 6, pp. 58-63.

8. Sychenko V. H. Modelyuvannya elektromahnitnykh protsesiv u tyahoviy merezhi postiynoho strumu [Simulation the electromagnetic processes in DC traction network]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 110-113.

Внутрішній рецензент Гетьман Г. К.

Зовнішній рецензент Денисюк С. П.

Електричні розрахунки систем тягового електропостачання прийнято виконувати з припущенням того, що реалізована електрорухомих складом потужність визначається лише значенням струму при номінальній напрузі. Поява сучасного електрорухомих складу, система управління якого здатна підтримувати постійну споживану потужність, та його експлуатація одночасно з існуючим призводить до невідповідності режиму напруги в тяговій мережі через прийняті припущення в розрахунках параметрів системи тягового електропостачання при проектуванні.

Проведені дослідження показали, що заміна тягового навантаження джерелом ідеального струму вносить суттєву похибку в розрахунки струмів фідерів, напруги на струмоприймачеві та втрати потужності в тяговій мережі. За допомогою визначення балансу та розподілу потужностей для різних схем живлення контактної мережі в аналітичному виді отримані функції опору, які фізично визначають закономірність зміни опору тягової мережі відносно рухомих тягового навантаження.

Отримані співвідношення функцій опору дозволяють сформулювати методику розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання при споживанні електрорухомих складом заданої потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачеві.

Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин за допомогою наведеної методики та аналітичні вирази отриманих для різних схем живлення контактної мережі функцій опору дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

УДК 621.331.3

Д. А. БОСЫЙ (ДНУЖТ)

Кафедра Електроснабження залізничних доріг, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua)

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА МГНОВЕННЫХ СХЕМ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ

Електрические расчеты систем тягового электроснабжения принято выполнять с предположением того, что мощность, которая реализуется электроподвижным составом, определяется только значением тока при номинальном напряжении. Появление нового электроподвижного состава, система управления которого способна поддерживать постоянную мощность, и его эксплуатация совместно с существующим приводит к несоответствию режима напряжения в тяговой сети из-за принятых упрощений в расчетах параметров системы тягового электроснабжения при проектировании.

Проведенные исследования показали, что замена тяговой нагрузки источником идеального тока вносит существенную погрешность в расчеты токов фидеров, напряжения на токоприемнике и потерь мощности в тяговой сети. С помощью определения баланса и распределения мощностей для разных схем питания контактной сети в аналитическом виде получены функции сопротивления, которые физически определяют закономерность изменения сопротивления тяговой сети относительно подвижной тяговой нагрузки.

Полученные соотношения функций сопротивления позволяют сформулировать методику расчета мгновенных схем системы тягового электроснабжения при потреблении электроподвижным составом заданной мощности при фактическом значении напряжения на токоприемнике.

Возможность применения прямого расчета электрических величин с помощью приведенной методики и полученные аналитические выражения функций сопротивления для разных схем питания контактной сети позволяют значительно упростить дальнейшие оптимизационные расчеты режимов работы систем тягового электроснабжения.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, электрическая тяга, мгновенная схема, баланс, распределение, постоянная мощность, функция сопротивления, режимы напряжения.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.331.3

D. O. BOSIY (DNURT)

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua)

## METHOD OF CALCULATION THE INSTANTANEOUS SCHEMES OF ELECTRIC TRACTION SYSTEM FOR CONSTANT POWER CONSUMPTION

Electrical calculations of traction power supply systems usually perform with the assumption that power of the electric rolling stock is determined only by the value of the current at nominal voltage. The using a new electric rolling stock with control system which able to maintain a constant power and its operation together with the existing results in the mismatch of the voltage mode in the traction network due to the simplifications that made in the calculation of the parameters of the traction power supply system when it was engineered.

Conducted researches have shown that the replacement of traction load by an ideal current source makes a significant error in the calculation of the currents of the feeders, the voltages on the pantographs and the power loss in the traction network. By determining the balance and the power distribution for the different schemes analytically were determined the functions of resistance that physically determines the resistance change depends on the moving traction load.

The obtained functions of resistance allow us to formulate a method of calculation the instantaneous schemes of electric traction system for constant power consumption of the electric rolling stock with the fixed power value and the actual voltage value on the pantograph.

The possibility of the direct electrical calculation using the above mentioned methods and the obtained analytical expressions of the resistance functions might simplify the further optimization the working modes of the traction power supply systems.

**Keywords:** power supply system, electric traction, instantaneous scheme, balance, distribution, constant power, function of resistance, voltage modes.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

© Босий Д. О., 2014