

В.Т. Доманський, І.В. Доманський, В.М. Шавкун

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЯГОВИХ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Проведено дослідження параметрів складних систем електропостачання трамвайних ліній, які потрібні при імітаційному моделюванні: статистичні характеристики тягових навантажень фідерів та напруги на шини тягових підстанцій. Розроблено метод розрахунку миттєвих схем, що дозволяє створити алгоритми які не залежать від ступені складності схеми. Запропоновано методику імітаційного моделювання складних систем електропостачання електротранспорту. Показані шляхи визначення енергоефективних режимів електропостачання.

Ключові слова: електротранспорт, тягові підстанції, електротягові мережі, складні системи електропостачання, енергоефективність режимів.

Постановка проблеми

У відповідності до стратегії розвитку та підвищення енергоефективності міських електро-тягових мереж на період 2020–2035 рр. необхідно покращення техніко-економічних показників систем електропостачання міського електротранспорту. У зв'язку з цим зростають вимоги щодо питань якості проектування та оптимізації вже працюючих систем електропостачання. Можливість проведення експериментів в реальній системі тягового електропостачання дуже обмежені, а порою і не можливі, але для рішення ряду задач необхідно імітувати будь-які режими, відтворювати будь-які експлуатаційні переключення.

Створення імітаційної моделі системи електропостачання зі складною конфігурацією тягової мережі дозволить вирішити низку теоретичних та практичних задач, зокрема підвищення енергоефективності електротягових мереж, визначення показників режимів під час проектування складних систем електропостачання, розробку методів і засобів для вимірювання втрат енергії в тяговій мережі.

Метою роботи є створення методів і алгоритмів імітаційної моделі системи електропостачання міського електротранспорту із складними схемами живлення тягових мереж і рішення задач проектування та експлуатації. Для досягнення поставленої мети необхідно провести дослідження параметрів складних схем електропостачання тягових мереж електротранспорту та розробити алгоритми моделювання системи електропостачання із складною схемою живлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Задачі розрахунку режимів систем тягового електропостачання вирішуються шляхом імітаційного моделювання і включають такі етапи: аналіз і вибір параметрів електротягових мереж та мереж енергосистем; аналіз графіків руху трамваїв і тролейбусів та визначення їх навантажень; формування миттєвих схем і визначення струмозподілу для кожної схеми [1–10].

Мета таких розрахунків полягає у визначенні витрати електричної енергії при русі рухомого складу та втрат в елементах систем тягового і зовнішнього електропостачання, а також контролю напруги на струмоприймачах трамваїв та тролейбусів і параметрів та показників систем тягового і зовнішнього електропостачання [4–8].

Значення тягових навантажень визначаються на основі тягових розрахунків або експериментально. Зазвичай тягові навантаження задаються величинами струмів, однак такий підхід недостатньо адекватно описує фізику процесів, що протікають. Водій трамвая або тролейбуса повинен дотримуватися заданої швидкості руху, тому зміна напруги на струмоприймачі призводить до необхідності регулювання струму для дотримання механічної потужності. Отже, завдання тягового навантаження споживаною потужністю є більш адекватним підходом, що відображає закон збереження енергії [5–7, 9, 10].

При режимних розрахунках використовують виконані, детерміновані і випадкові графіки руху електричного транспорту. Детерміновані графіки застосовуються при визначенні пропускної здатності

ділянки електротранспортної лінії за системою електропостачання. До моделювання на основі ймовірнісних графіків вдаються при проектуванні систем тягового електропостачання (СТЕ) та визначенні втрат електроенергії [6, 7].

Моделювання СТЕ з урахуванням режимів роботи живильних енергосистем можна здійснити на спеціалізованих імітаційних моделях електро-тягових систем нового покоління [5, 10, 11] а також шляхом використання універсальних програм типу Electronics Workbench та інших у середовищі MATLAB. Практична реалізація спеціалізованих імітаційних моделей двоколіїних, одноколіїних ділянок, складних систем живлення залізниць і метрополітенів відображені в роботах [10, 11].

Методи і програмні засоби розрахунків режимів СТЕ, що застосовуються на сьогодні, базуються на спрощеному уявленні системи зовнішнього електропостачання (СЗЕ) шляхом її еквівалентування. При цьому зовнішня мережа спрощено еквівалентується реактансами, обумовленими потужністю короткого замикання на шинах високої напруги тягових підстанцій (ТП). Елементи СТЕ задаються відповідними комплексними опорами, а тягові навантаження подаються джерелами струму. Такий підхід забезпечує прийнятну точність тільки при досить потужній СЗЕ, коли однофазні тягові навантаження не приводять до істотної несиметрії на шинах напруги ТП.

В останні роки з'явилися програмні продукти високого ступеня універсальності у галузі електротехніки, механіки тощо, що дозволяють здійснювати моделювання електротягових мереж у середовищі MATLAB. До переваг моделей у середовищі MATLAB слід віднести можливість швидкого отримання результатів моделювання екстремальних значень електротехнічних розрахунків, а також пропускну здатності, максимальних значень струмів, втрат напруги, перетоків потужності, роботи комутаційної апаратури, релейного захисту.

У найбільш універсальних спеціалізованих моделях [10–15] з використанням теорії графів і розріджених матриць створений єдиний підхід розрахунку схем будь-якого ступеня складності СТЕ для ділянок постійного і змінного струму. Матричний метод формування ймовірнісних та виконаних графіків руху електрорухомого складу (ЕРС) на одноколіїних і двоколіїних ділянках дозволяє легко об'єднувати вектори задаючих струмів трамваїв і тролейбусів у єдиний вектор струмів для всієї ділянки. Єдиний імітаційний комплекс для вузлів зі складною організацією руху ЕРС дозволяє враховувати необмежену кількість типів рухомого складу, його стоянки, обгони, перетоки потужності по контактній мережі, роботу компенсуючих і різних вольтододаткових пристроїв ліній СЗЕ.

Модель дозволяє визначити миттєві, середні, ефективні струми, втрати напруги і потужності у будь-якій точці контактної мережі з урахуванням режимів роботи СЗЕ. Останнє вельми важливо при розробці моделей, що працюють у режимах реального часу в інтелектуальних системах управління пристроями електропостачання [16–22].

Виклад основного матеріалу

Дослідження параметрів складних схем електропостачання тягових мереж електротранспорту. Більшість параметрів системи тягового електропостачання, які необхідні при імітаційному моделюванні достатньо простих схем відомі. При імітаційному моделюванні складних систем електропостачання виникають труднощі вибору опору тягової мережі складних ділянок, урахування навантажень деповських колій і напруги холостого ходу на вводах тягових підстанцій. Нижче приведені результати досліджень, які дозволяють вносити ясність в ці питання, а саме способу експериментального вимірювання на реальних ділянках навантажень фідерів, що живлять трамвайні або тролейбусні депо та напруги на вводах суміжних тягових підстанцій. Запропоновано моделювання навантажень фідерів, що живлять трамвайні та тролейбусні депо та напруги холостого ходу на вводах тягових підстанцій по їх статистичним характеристикам. Для цього виконана обробка результатів статистичних вимірювань і отримані закони і функції розподілення цих величин.

Статистичні характеристики тягових навантажень фідерів. При моделюванні складних схем тягового електропостачання всі фідери, які живлять контактну мережу, можна за специфікою навантажень розділити на: фідери, що живлять перегони міжпідстанційних зон; фідери, що живлять кінцеві граничні ділянки; фідери, що живлять депо. Для імітаційної моделі визначення навантажень фідерів, що живлять розрахункові перегони, проводиться на основі рішення ряду послідовних миттєвих схем шляхом моделювання графіка руху трамваїв або тролейбусів.

На кінцевих граничних ділянках імітаційної моделі визначення навантажень фідерів пропонується вести спрощено без відтворення графіка руху трамваїв або тролейбусів. Таке спрощення цілком допустимо, тому що вплив кінцевих ділянок на загальний результат розрахунку незначний. У той же час це істотно зменшить витрати машинного часу. Для цього передбачається визначати навантаження фідерів, що живлять кінцеві ділянки по функції розподілу ймовірності струму шляхом розігрування величини струму на кожному кроці моделювання. У дослідженнях [4–9], показано, що для опису струмів фідерів можна скористатися

кривою розподілу Пірсона третього типу або усіченим нормальним законом.

Функція розподілу ймовірності струму фідера в разі розподілу Пірсона третього типу має вигляд:

$$F(I) = \begin{cases} K \int_0^{I_{max}} |I - \alpha|^\gamma \exp[-\beta(I - \alpha)dI] & , \text{якщо } I_{max} > I > 0; \\ 0 & , \text{якщо } I > I_{max}; \end{cases} \quad (1)$$

де K – постійна інтегрування, що визначається з умови

$$\int_0^{I_{max}} f(I) dI = 1, K = \frac{|\beta|^{\gamma+1}}{\Gamma\{(\gamma+1), \beta(I_{max}-\alpha)\} - \Gamma\{(\gamma+1), -\alpha\beta\}}$$

Тут $\Gamma(t, x)$ табульована неповна гамма функція; I_{max} – максимальне можливе значення струму фідера. Коефіцієнти α, β, γ визначаються за виразами

$$\alpha = \frac{2pn+1}{2(2p-1)}; \beta = \frac{2}{1-2p}; \gamma = \frac{4p(1-p)(n+1)}{(2p-1)^2}.$$

$$F(I) = \begin{cases} M \int_{-\infty}^{I_{max}} \exp\left[-\frac{2}{I_{max}+1}\left(I - \frac{1}{2}I_{max}\right)\right]^2 dI & , \text{якщо } 0 < I < I_{max}; \\ 0 & , \text{якщо } I > I_{max}; \end{cases} \quad (2)$$

де $M = \frac{1}{\sqrt{2\pi(I_{max}+1)} \Phi\left(\frac{I_{max}}{I_{max}+1}\right)}$; $\Phi(Z)$ – нормована функція Лапласа.

Зазвичай депо живляться окремими фідерами від шин тягових підстанцій. Закони розподілу навантажень цих фідерів невідомі. З метою їх встановлення були проведені серії статистичних вимірів навантажень на фідері, що живить депо. Вимірювання навантажень проводилися реєструючими приладами протягом року. Після обробки

де p – ймовірність того, що будь-яка нитка графіка руху зайнята трамваем або тролейбусом ($P = n/N_0$); n – максимальна кількість трамваїв або тролейбусів, які можуть знаходитися одночасно в зоні.

Якщо коефіцієнт використання пропускної здатності лежить в інтервалі 0,45÷0,55, то за даними роботи [7] слід замість розподілу Пірсона використовувати усічений нормальний закон, функція розподілу якого має вигляд:

була отримана вибірка значень струму фідера.

Обробка статистичної сукупності, визначення її основних числових характеристик і вибір теоретичного закону розподілу, якому підпорядкована випадкова величина, виконувалася на ЕОМ з використанням пакету прикладних програм з обробки статистичних даних. Результати розрахунку основних числових характеристик емпіричного розподілу зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Параметри розподілу струму фідера, що живить депо

Середнє значення	Середньоквадратичне відхилення	Асиметрія	Ексцес	Коефіцієнт варіації
$I_{ст}, A$	σ, A	A	E	v
649	218	0,96	1,96	33,5

За даними експериментальних вимірів побудовано теоретичну криву логарифмічно нормального розподілу з параметрами $\mu_1 = 41,2$ (А), $\sigma_1 = 3,3$ (А) і гістограму струму фідера, що живить депо (рис. 1).

Значення критерію $X^2 = 29,5$ дозволяє стверджувати з ймовірністю 0,1, що величина струму фідера, що живить депо розподілена по логарифмічно нормальному закону.

$$F(I, \bar{I}, \sigma_I) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_I \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_{max}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_I^2}(\ln I - \bar{I})^2\right] & , \text{якщо } I > 0, -\infty < \bar{I} < \infty; \sigma_I > 0 \\ 0 & , \text{інших випадках} \end{cases} \quad (3)$$

Надалі облік навантажень фідерів, що живлять депо на кожному кроці моделювання виконувався за даною функцією розподілу.

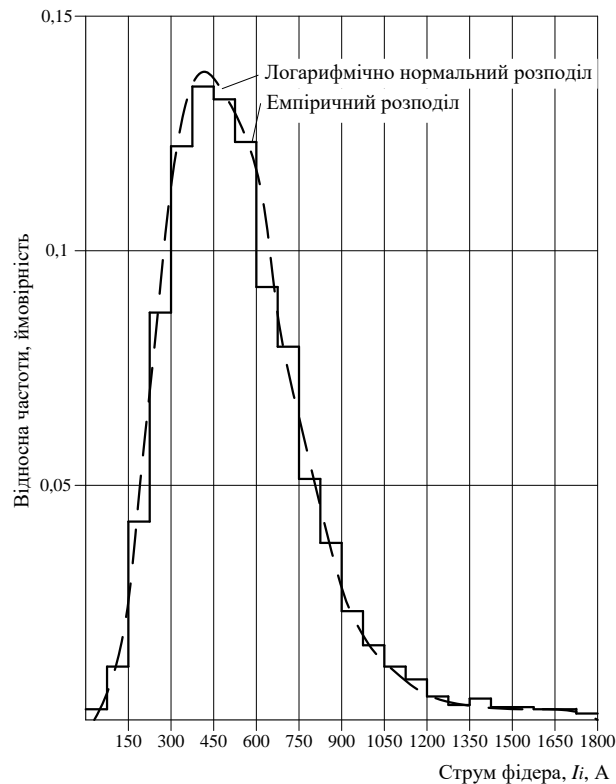


Рис. 1. Емпіричний розподіл струму фідера, що живить трамвайне депо

Статистичні характеристики напруги на вводах тягових підстанцій. Напряга холостого ходу на вводах тягових підстанцій є комплексною випадковою величиною. З метою дослідження закону розподілу випадкової величини \dot{U}_x були проведені серії вимірів напруг на вводах тягових підстанцій. При цьому враховувалося, що вектори напруг холостого ходу суміжних тягових підстанцій можуть відрізнитися як по модулю, так і бути зсунуті відносно один одного на деякий кут δ .

При вимірюванні модулів напруги \dot{U}_x тягові підстанції повинні знаходитись у режимі холостого ходу. Реєстрація напруги здійснювалася вольтметрами. Кути δ між напругами холостого ходу

суміжних тягових підстанцій можна було б виміряти, маючи на кожній з підстанцій ідентичні джерела опорної напруги. Практично таке вирішення питання важко здійснимо. Тому для визначення кутів δ була зібрана схема з двостороннім живленням (рис. 2). В цьому випадку в якості опорного вектору, по відношенню до якого можна вимірювати кути, взятий зрівняльний струм. Вимірювання проводилися в моменти відсутності трамваїв та тролейбусів на міжпідстанційній зоні.

В процесі вимірів модулів напруги на вводах тягових підстанцій $U_{ш1}$ і $U_{ш2}$ одночасно реєструвалися зрівняльні струми I_{y1} і I_{y2} і кути зсуву фаз φ_1 і φ_2 між напругами і зрівняльними струмами.

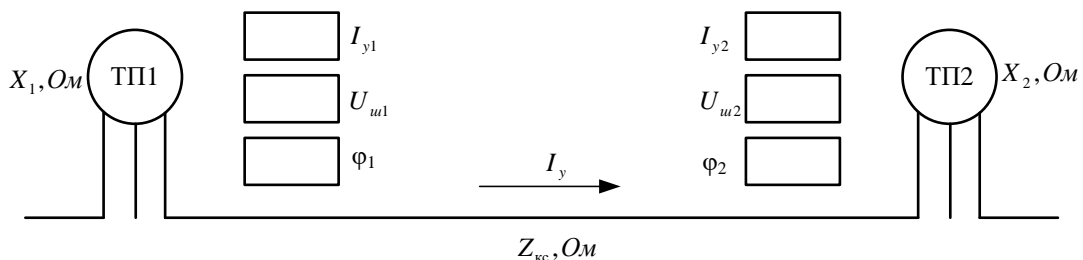


Рис. 2. Схема ділянки для дослідження напруги на вводах

Для визначення кутів δ розглянемо векторну діаграму, показану на рис. 3. Вектори напруги на шинах суміжних підстанцій $U_{ш1}$ і $U_{ш2}$ можна

побудувати, знаючи їх виміряні модулі і кути φ_1 і φ_2 по відношенню до зрівняльного струму.

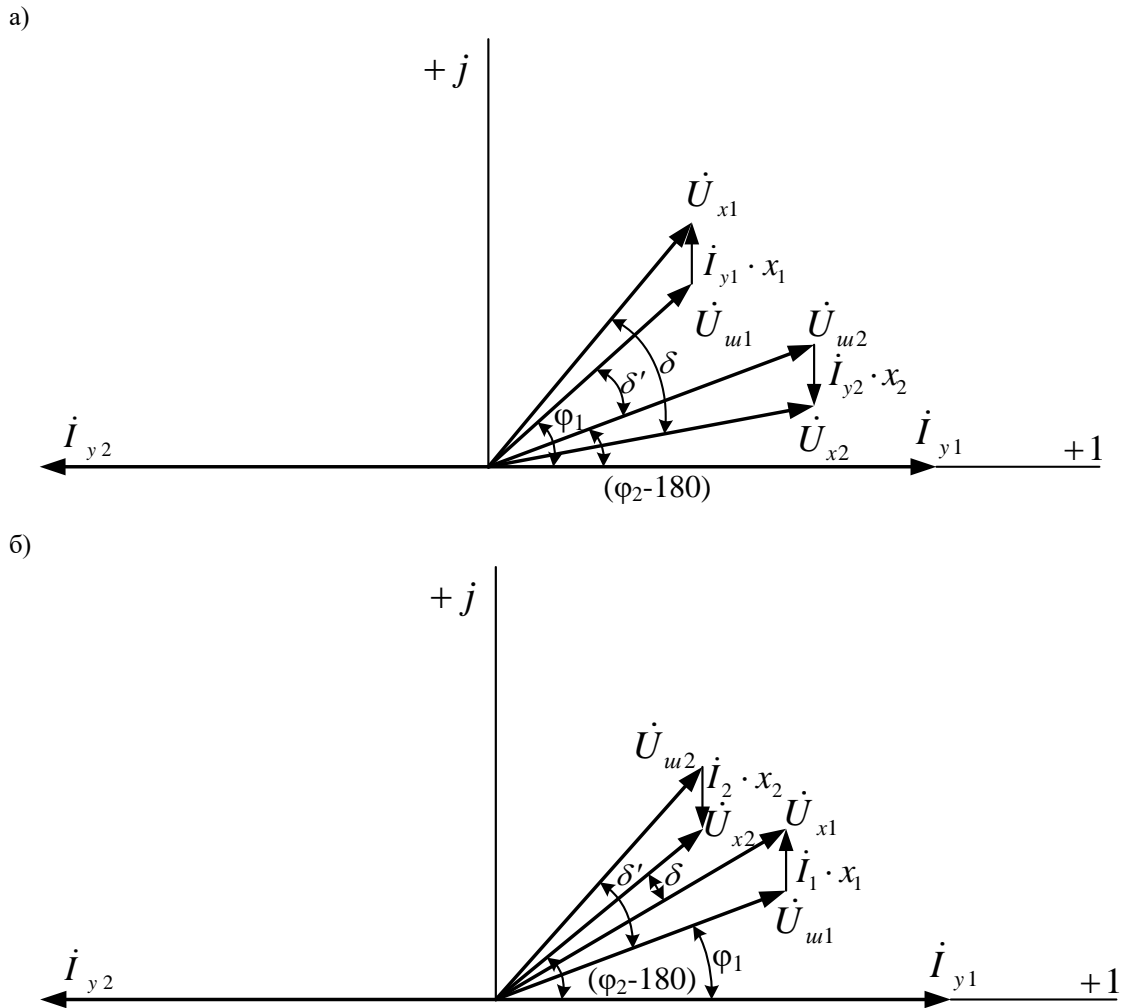


Рис. 3. Визначення кутів δ між векторами суміжних тягових підстанцій

Падіння напруги на трансформаторах тягових підстанцій від зрівняльного струму без урахування активної складової відповідно рівні $I_{y1}x_1$ і $I_{y2}x_2$. Тоді напругу холостого ходу на вводах тягових підстанцій \dot{U}_x легко знайти за очевидною формулою

$$\dot{U}_x = \dot{U}_w + \dot{I}_y x. \quad (4)$$

Кут δ між напругами \dot{U}_{x1} і \dot{U}_{x2} буде дорівнювати

$$\delta = \arctg \frac{Im \dot{U}_{x1}}{Re \dot{U}_{x1}} - \arctg \frac{Im \dot{U}_{x2}}{Re \dot{U}_{x2}} \quad (5)$$

Підставляючи значення \dot{U}_x із (4) в (5), отримуємо

$$\delta = \arctg \frac{Im \dot{U}_{w1} + Im \dot{I}_{y1} x_1}{Re \dot{U}_{w1}} - \arctg \frac{Im \dot{U}_{w2} - Im \dot{I}_{y2} x_2}{Re \dot{U}_{w2}}, \quad (6)$$

$$\text{де } \dot{U}_{w1} = \dot{U}_{w1} \cdot e^{j\varphi_1}; \quad \dot{U}_{w2} = \dot{U}_{w2} \cdot e^{j\varphi_2}$$

У формулі (6) всі величини можуть бути вимірні. Кут $\delta > \delta^1$, якщо $\varphi_1 > \varphi_2 - 180^\circ$ (рис. 3, а), і $\delta < \delta^1$, якщо $\varphi_1 < \varphi_2 - 180^\circ$ (рис. 3, б).

Слід зазначити, що на зрівняльний струм може накладатися деякий струм \dot{I}_H , обумовлений навантаженнями не тягових споживачів і ємнісним струмом витоку [6, 7]. Повністю усунути струм \dot{I}_H неможливо, його можна лише зменшити, відключивши нетягових споживачів.

Векторна діаграма для цього випадку наведена на рис. 4 для зручності на діаграмі з дійсною віссю поєднано напругу, а не зрівняльний струм.

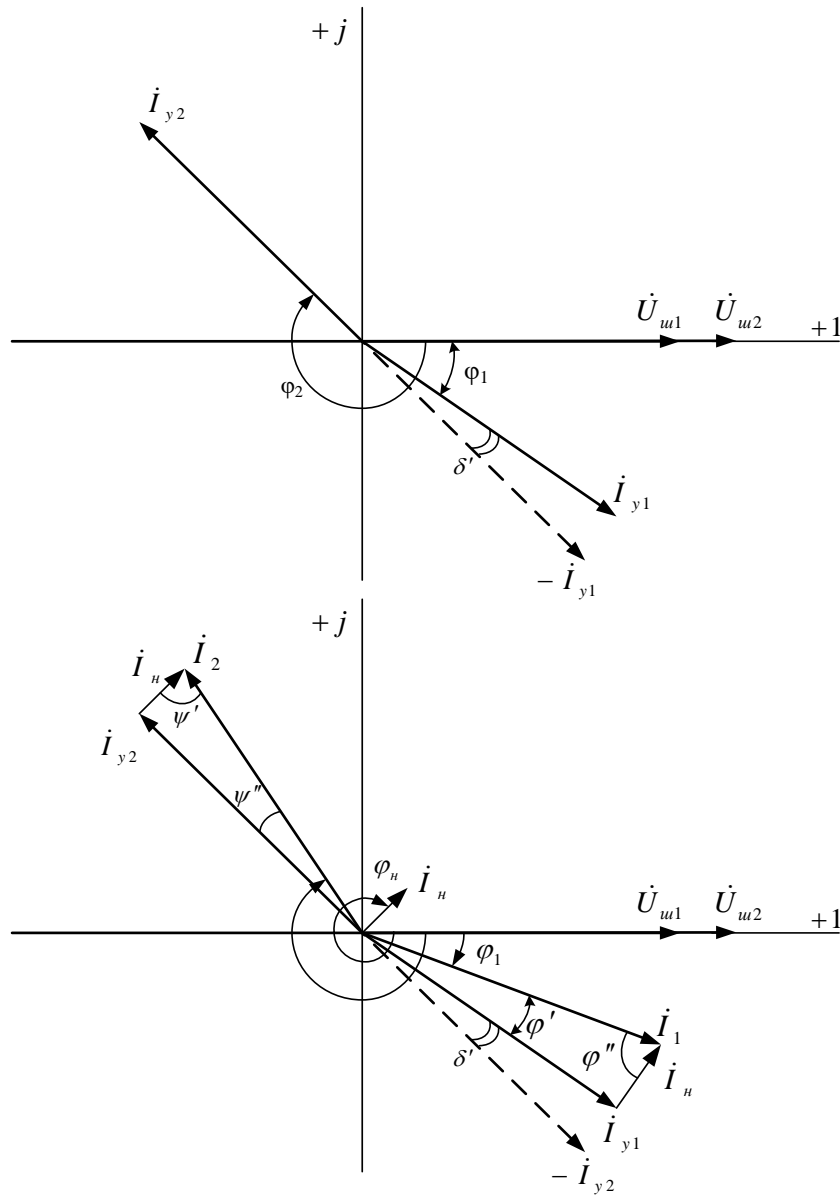


Рис. 4. Визначення кутів φ_1 і φ_2 між вектором зрівняльного струму і векторами напруги U_{u1} і U_{u2}

З діаграми видно (рис. 4, б), що безпосередньо виміряти кути φ_1 і φ_2 неможливо. Виміряти можна лише кути φ_1' і φ_2' , знаючи які легко знайти кути φ_1 і φ_2 :

$$\varphi_1 = \varphi_1' + \arcsin \frac{I_n \cdot \sin \varphi'}{\sqrt{I_1^2 + I_n^2 - 2I_1 I_n \cdot \cos \varphi'}} \quad (7)$$

$$\varphi_2 = \varphi_2' + \arcsin \frac{I_n \cdot \sin \varphi'}{\sqrt{I_2^2 + I_n^2 - 2I_2 I_n \cdot \cos \varphi'}}$$

де φ_1 – кут між напругою U_{u1} і струмом I_1 ; φ_2' – кут між напругою U_{u2} і струмом I_2 ; I_1 – модуль суми

зрівняльного струму I_{y1} та струму навантаження, віднесеного до даної підстанції; I_2 – модуль суми зрівняльного струму I_{y1} і струму навантаження віднесеного до даної підстанції; $\varphi' = 360^\circ - \varphi_n + \varphi_1'$; $\varphi' = \varphi_n + \varphi_2'$; φ_n – кут між напругою холостого ходу U_x та струмом I_n .

Розрахунку на ЕОМ показали, що з ймовірностями $P_{\Delta U} = 0,2$; $P_\delta = 0,3$ емпіричні розподіли випадкових величин ΔU_x і δ найкращим чином апроксимуються нормальним усіченим законом. На рис. 5 та рис. 6 наведено емпіричні розподіли ΔU_x і δ та нормальні усічені розподіли з параметрами $\mu_{\Delta U} = 0,122$ кВ; $\sigma_{\Delta U} = 1,0$ кВ і $\mu_\delta = 1,576$ град.; $\sigma_\delta = 0,877$ град.

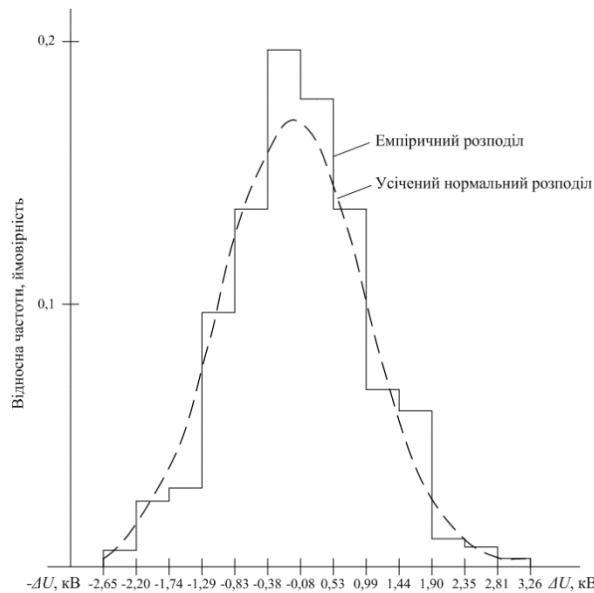


Рис. 5. Емпіричний розподіл модуля відхилення напруги холостого ходу ΔU_x від середнього значення

Функції розподілу випадкових величин ΔU_x і δ визначаються за формулами

$$F(\delta) = \frac{1}{M\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} \exp\left[-\frac{\delta - \bar{\delta}}{2\sigma_\delta}\right], \quad (9)$$

$$F(\Delta U_x) = \frac{1}{M\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{\Delta U_x - \bar{\Delta U}_x}{2\sigma_x}\right], \quad (8)$$

де $M = \Phi\left(\frac{\delta_{max} - \bar{\delta}}{\sigma_\delta}\right) - \Phi\left(\frac{\delta_{min} - \bar{\delta}}{\sigma_\delta}\right)$ – нормуючий множник; $\bar{\delta}$ і σ_δ – параметри усіченого розподілу.

де $M = \Phi\left(\frac{\Delta U_{xmax} - \bar{\Delta U}_x}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{\Delta U_{xmin} - \bar{\Delta U}_x}{\sigma_x}\right)$ – нормуючий множник; $\bar{\Delta U}_x$ і σ_x – параметри усіченого розподілу.

Результати розрахунку основних числових характеристик емпіричного розподілу випадкових величин ΔU_x і δ зведені в таблицях 2 і 3.

Таблиця 2

Параметри емпіричного розподілу модулів відхилень напруги холостого ходу ΔU_x від середнього значення

Середнє значення $\Delta U_x, кВ$	Середньоквадратичне відхилення $\sigma, кВ$	Асиметрія А	Екссес Е	Коефіцієнт варіації
0,122	1,0	- 0,238	1,523	82193

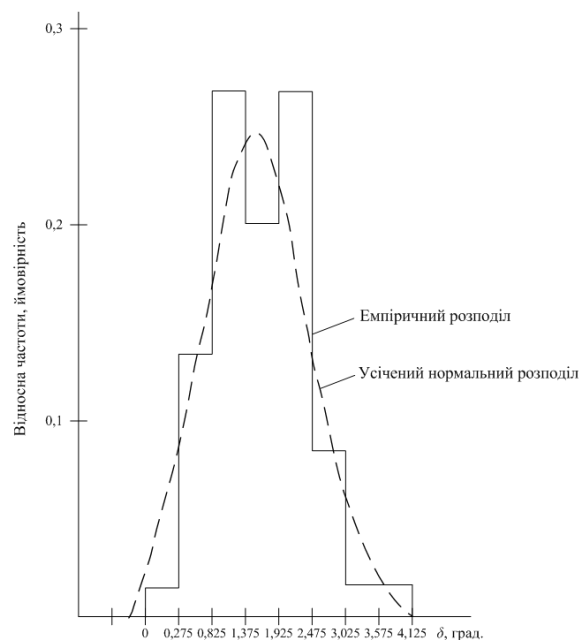


Рис. 6. Емпіричний розподіл кутів δ між напругами холостого ходу суміжних тягових підстанцій

Параметри емпіричного розподілу кутів δ між напругами холостого ходу суміжних тягових підстанцій

Середнє значення δ , град.	Середньоквадратичне відхилення δ , град.	Асиметрія А	Екссес Е	Коефіцієнт варіації
1,576	0,877	0,312	- 0,523	55,67

Встановлено, що функції розподілу фідера, що живить трамвайне депо відповідає логарифмічно нормальному закону, функції розподілу модулів відхилення напруги холостого ходу і кутів між напругами холостого ходу суміжних тягових підстанцій усіченому нормальному закону. Надалі визначення напруги на шинах тягових підстанцій на кожному кроці моделювання виконується за формулами (8, 9).

Складання інформаційних баз моделюваної ділянки електротягової мережі міського електротранспорту вимагає знання цілого ряду параметрів: навантажень трамваїв та тролейбусів, тягових навантажень фідерів, напруг холостого ходу тягових підстанцій, питомих опорів тягової мережі та зовнішньої системи електропостачання.

Імітаційне моделювання системи електропостачання із складною схемою живлення. У зв'язку з підвищенням інтенсивності руху на міському електротранспорті можливість проведення експериментів в реальній системі тягового електропостачання дуже обмежені, а порою і не можливі, але для рішення ряду задач необхідно імітувати будь-які режими, відтворювати будь-які експлуатаційні переключення.

Імітаційна модель – це алгоритм або програма, яка описує дійсні фізичні процеси в системі електропостачання міського електротранспорту. Основною особливістю і характерною ознакою імітаційної моделі є те, що вона має можливість замінювати реальний об'єкт на різних етапах дослідження і давати інформацію про нього.

Імітаційна модель – це сукупність опису

електротягової системи і зовнішніх впливів, алгоритмів функціонування (правил зміни стану системи) під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів. Ці алгоритми і правила не дають можливості використання наявних математичних методів аналітичного і числового розв'язання, але дозволяють імітувати процес функціонування системи і проводити вимірювання цікавих для нас характеристик.

Використання імітаційного моделювання у практиці проектування СТЕ дозволяє виконувати розрахунки складних схем електропостачання і сприяє значному підвищенню якості розрахунків. Це дає можливість вибрати раціональні варіанти системи електропостачання складних схем. Імітаційну модель системи тягового електропостачання міського електротранспорту можливо представити як сукупність наступних частин: блок імітації напруги на шинах тягової підстанції, що дозволяє урахувати вплив СЗЕ; блок імітації СТЕ; блок імітації навантажень та організації руху трамваїв та тролейбусів; обчислювальний блок. В обчислювальному блоці здійснюється розрахунок миттєвих схем, розрахунок струмів короткого замикання, автоматично складаються вихідні матриці активних і пасивних параметрів віток, проводиться статистична обробка результатів розрахунку.

В основу пропонованої імітаційної моделі покладено синтез матричного методу розрахунку миттєвих схем і методу статистичних випробувань для обліку організації руху електрорухомого складу (трамваїв і тролейбусів). Структурна схема імітаційної моделі системи електропостачання міського електротранспорту показана на рис. 7.

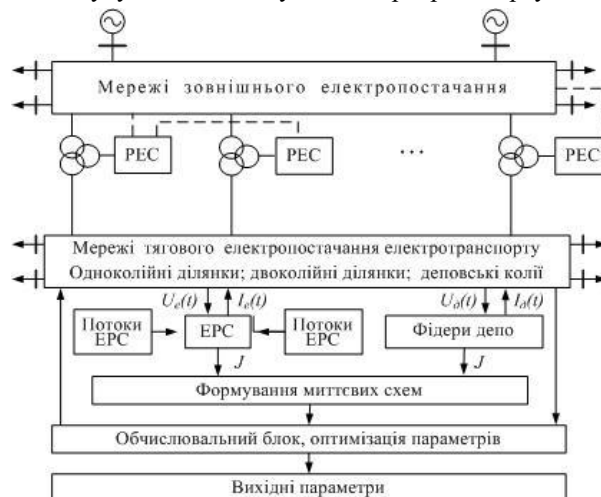


Рис. 7. Структурна схема імітаційної моделі: ПЕС – лінії електропередач районів електропостачання

Усі спеціалізовані моделі вимагають створення баз даних пасивних (питомі опори) і активних (результати тягових розрахунків) параметрів. Процес створення баз даних досить трудомісткий, займає багато часу [10], але, безумовно, при цьому досягається висока точність у визначенні електротехнічних розрахунків у нормальних і вимушених режимах та можливість проведення складних експериментів, наукових досліджень.

Значно підвищує точність кінцевих результатів і використання даних нових мікропроцесорних лічильників електроенергії на ЕРС при експериментальному визначенні навантажень трамваїв і тролейбусів різних типів з дискретністю усереднених струмів у діапазоні 0,01–1 хв при формуванні матриць струмів у вузлах модельованої схеми [7, 9]. Обрані таким способом навантаження і реальні дані пасажиропотоків дозволяють знайти оптимальні потужності тягових підстанцій.

Запропоновані основні принципи побудови імітаційної моделі дозволяють розв'язувати такі актуальні практичні задачі: вибір режимів енергозбереження роботи СТЕ з урахуванням норм місткості рухомого складу, частоти руху і профілю колії, пристроїв поздовжньої і поперечної компенсації реактивної потужності в лініях живлення тягових підстанцій; мінімізацію втрат електроенергії в елементах СТЕ; розрахунок зрівняльних струмів і визначення їх впливу на техніко-економічні показники СТЕ; оцінку напруги на струмоприймачі ЕРС під час його руху; оцінку навантаження окремих

елементів СТЕ з можливістю прогнозування їх стану; оцінку максимальних робочих струмів фідерів для вибору уставок захистів.

Розрахунки режимів систем тягового і зовнішнього електропостачання проводяться шляхом послідовного розрахунку ряду миттєвих схем, що утворюються при русі ЕРС. Формування миттєвої схеми вимагає наявності такої інформації: схеми з'єднання СЗЕ та їх параметри; місця розташування електротягових навантажень на цей момент часу, які визначаються ймовірнісним або виконаним графіком руху трамваїв або тролейбусів; величини значення електротягових навантажень ЕРС на цей момент часу із тягових розрахунків або дослідних поїздок.

Міжпідстанційна зона може бути складною схемою живлення одноколіїних, двоколіїних, триколіїних ділянок з постом секціонування і деповських колій. Граф $G_s = (V_s, L_s)$ схеми (рис. 8) включає повітряну лінію енергосистеми, що живить одну фідерну зону і деповські колії, причому $b_{is} \in V_s$ і $l_{is} \in L_s$.

Безліч $V_s = \{1, 2, \dots, K\}$ містить $K = p + q + n + t$ вузлів, які пронумеровані порядковими числами, де p вузлів має зовнішня система електропостачання; q – тягові мережі депо; n – тягова мережа двоколіїних ділянок; t – тягова мережа одноколіїних ділянок. Тягова мережа багатоколіїних ділянок може бути подана комбінацією одноколіїних і двоколіїних.

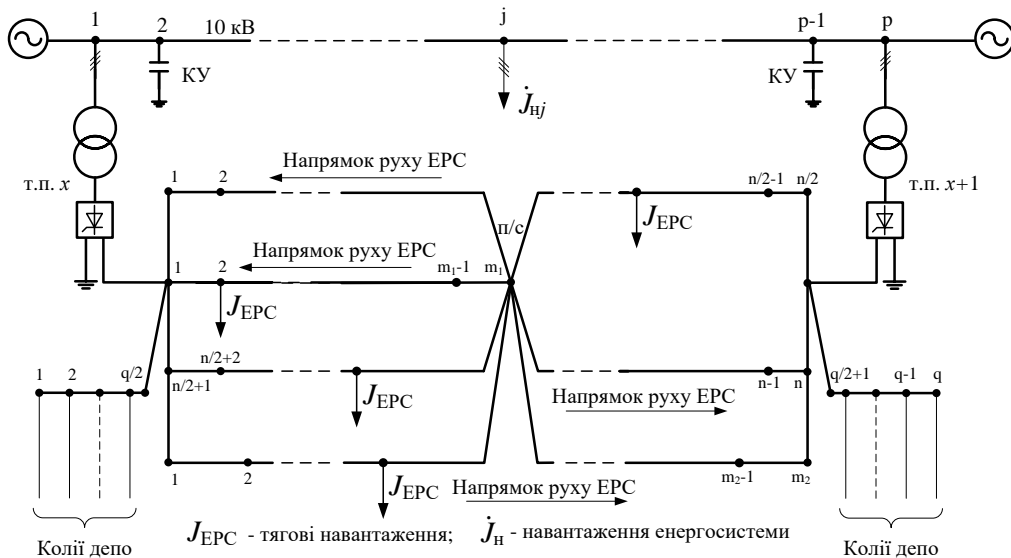


Рис. 8. Фрагмент енергосистеми і тягової мережі міського електротранспорту

У вузлах СЗЕ і тягової мережі можна задавати навантаження відповідно до закону його зміни у часі. Вузлом тягової мережі є не тільки з'єднання віток схеми, але і точки рухомих навантажень ЕРС

трамваїв або тролейбусів. З цією метою тягова мережа розбивається на безліч спеціальних вузлів відповідно до швидкості руху різнотипних трамваїв. Кожен тип трамваїв споживає у момент часу t у

своєму вузлі струм, який визначений характеристикою рухомого складу, профілем колії, режимом руху та ін. Навантаження деповських колій, компенсуючих пристроїв СЗЕ задаються залежностями, наведеними в [10].

Припустимо, у момент часу t навантаження мережі мали місце у вузлах, показаних на рис. 8, задаючими струмами. Перетворимо граф $G_s = (V_s, L_s)$ у миттєвий граф $G_{st} = (V_{st}, L_{st})$ і визначимо його залежності. Матриці, які відносяться до дерева графа схеми, позначатимемо індексом α , а до хорд схеми – індексом β .

При розрахунку електротягових мереж необхідно визначити величини: вектор струмів у вітках схеми $\dot{I}_B = (\dot{I}_{B1}, \dot{I}_{B2}, \dots, \dot{I}_{Bn})$, вектор падінь напруги у вітках схеми $\dot{U}_B = (\dot{U}_{B1}, \dot{U}_{B2}, \dots, \dot{U}_{Bn})$, вектор падінь напруги у вузлах схеми щодо базисного вузла $\Delta\dot{U} = (\Delta\dot{U}_1, \Delta\dot{U}_2, \dots, \Delta\dot{U}_m)$, втрати потужності ΔS , втрати енергії ΔW . Зручно, розглядаючи мережі різної номінальної напруги,

$$\begin{pmatrix} M \\ NZ_B \end{pmatrix} \cdot \dot{I}_B = \begin{pmatrix} \dot{J} \\ N(\dot{E} + \dot{E}_\tau) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

де M і N – матриці перетинів і контурів (перша і друга матриці інцидентій); Z_B – матриця опорів віток;

$\dot{I}_B = (\dot{I}_{\alpha 1}, \dot{I}_{\alpha 2}, \dots, \dot{I}_{\alpha n}, \dot{I}_{\beta 1}, \dots, \dot{I}_{\beta n})$ – вектор струмів віток;
 $\dot{J} = (\dot{J}_1, \dot{J}_2, \dots, \dot{J}_m)$ – вектор задаючих струмів.

Для скорочення витрат машинного часу доцільно перетворити матричні рівняння. З цією метою струми у вітках схеми подають на підставі методу накладення у вигляді суми $\dot{I}_B = \dot{I}_B' + \dot{I}_B''$. Тут складова \dot{I}_B' пов'язана з контурними струмами

складати дерево графа так, щоб останні τ віток дерева виявилися пов'язаними з першими τ хордами через трансформації.

Застосування графів при розрахунку СТЕ дозволяє створити однотипні алгоритми для розрахунку схем будь-якої складності для безлічі міжпідстанційних зон і звести розрахунок до формальної заміни початкових даних у вигляді матриць і алгебричних операцій з ними.

Перспективні три варіанти розрахунку СТЕ постійного струму спільно з енергосистемами, що живлять їх: сумісний розрахунок мереж з використанням трансформацій; метод декомпозиції і синтезу при розгляданні мереж з різними рівнями напруги і родами струму; метод ітерацій для схем заміщення з однією базисною напругою і врахуванням впливу СЗЕ шляхом моделювання напруги холостого ходу тягових підстанцій як незалежних випадкових величин, розподілених за нормальним усіченим законом розподілу.

Узагальнене рівняння стану для миттєвого графа $G_{st} = (V_{st}, L_{st})$ має вигляд:

співвідношенням $\dot{I}_B' = N_t \dot{I}_k$, де N_t – транспонована друга матриця інцидентій; \dot{I}_k – вектор контурних струмів. Складову \dot{I}_B'' , залежну від задаючих струмів трамваїв або тролейбусів, можна знайти з виразу $\dot{I}_B'' = \begin{pmatrix} M_\alpha^{-1} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \dot{J}$, де M_α^{-1} – обернена матриця

інцидентій для дерева схеми. Тоді для визначення струмів у вітках схеми за відомим навантаженням трамваїв або тролейбусів і навантаженням зовнішньої системи електропостачання одержимо вираз:

$$\dot{I}_B = N_t \left\{ (NZ_B N_t)^{-1} \left[N(\dot{E} + \dot{E}_\tau) - NZ_B \begin{pmatrix} M_\alpha^{-1} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \dot{J} \right] \right\} + \begin{pmatrix} M_\alpha^{-1} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \dot{J}. \quad (11)$$

Падіння напруги на ділянці мережі від будь-якого вузла до базисного знаходиться за виразом:

$$\Delta\dot{U} = M_{\alpha t}^{-1} \dot{U}_\alpha, \quad (12)$$

де $\dot{U}_\alpha = Z_\alpha \dot{I} - \dot{E}_\alpha$ – вектор падіння напруги на вітках дерева схеми; \dot{E}_α – е.р.с. у вітках дерева схеми.

Розрахунок втрат потужності і енергії, як відомо, зводиться до послідовного розрахунку ряду миттєвих схем. Тому під розрахунками втрат потуж-

ності і енергії в складних тягових мережах міського електротранспорту надалі будемо розуміти розрахунки, що проводяться над миттєвими схемами.

Втрати енергії за розрахунковий період T складають:

$$\Delta W_a = \int_0^T \Delta P(t) dt, \quad (13)$$

де $\Delta P(t)$ – втрати потужності в момент часу t .

При розрахунках втрат енергії на ЕОМ величину $\Delta P(t)$ можна визначити лише з певним кроком квантування часу в результаті вирішення

відповідних миттєвих схем. Тому замість (13) вдається реалізувати формулу:

$$\Delta W_a = \sum_{i=1}^n \Delta P_i, \quad (14)$$

де ΔP_i – втрати потужності при розрахунку i -ої миттєвої схеми; n – кількість вирішених миттєвих схем.

Втрати потужності в тяговій мережі без розрахунку струморозподілу можна знайти за формулою:

$$\Delta P = J_t (MR_B^{-1} M_t)^{-1} J, \quad (15)$$

де J_t – транспонований вектор струмів в вузлах схеми.

Якщо визначено вектор втрат напруги в вузлах схеми, втрати потужності визначаються за формулою:

$$\Delta P = J_t \Delta U, \quad (16)$$

де J_t – транспонований вектор задаючих струмів вузлів.

Втрати потужності можуть бути знайдені за простішою формулою, яка не потребує обернених матриць, якщо попередньо був виконаний струморозподіл:

$$\Delta P = I_{Bt} R_B I_B, \quad (17)$$

де I_{Bt} – транспонований вектор струмів в вітках схеми.

Доречно відзначити, що зрівнювальний струм може протікати по тяговій мережі і за рахунок різних нахилів зовнішніх характеристик тягових підстанцій, а також при різних навантаженнях суміжних з розрахунковою фідерних зон. З урахуванням сказаного, напругу на шинах тягової підстанції \dot{U}_x (рис. 8), необхідну для розрахунку зрівнювального струму, слід визначати за формулою:

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{xx} - \Delta \dot{U}_c, \quad (18)$$

де \dot{U}_{xx} – напруга холостого ходу; $\Delta \dot{U}_c$ – падіння напруги в системі зовнішнього електропостачання і на тяговому трансформаторі від навантажень суміжних фідерних зон.

Процес моделювання напруги \dot{U}_x на шинах тягових підстанцій відбувається у декілька етапів.

Спочатку визначається модуль напруги холостого ходу за формулою:

$$U_{xx} = \bar{U}_{xx} \pm \Delta U_x, \quad (19)$$

де ΔU_x – випадкова величина, яка визначається відповідно до нормального усіченого закону.

Напруга холостого ходу \dot{U}_{xx} на одній з підстанцій орієнтується відповідно до фази, що живить модельовану зону. Потім моделюється кут δ , і напруга холостого ходу суміжної тягової підстанції визначається на комплексній площині.

Після того як напруга холостого ходу \dot{U}_{xx} буде змодельована для всіх підстанцій, визначається падіння напруги в СЗЕ і на тяговому трансформаторі від навантажень суміжних фідерних зон $\Delta \dot{U}_c$ і за формулою (18) розраховується напруга \dot{U}_x , яка і підставляється у вектор е.р.с. віток \dot{E} . Потім, використовуючи формули (11), (12), (17), знаходять струморозподіл, втрати напруги у вузлах схеми і втрати потужності (рис. 8). Таким чином розрахунок струморозподілу в електротягових мережах можна вести із спрощеним врахуванням СЗЕ.

Електричні розрахунки при проектуванні СТЕ зазвичай виконують для трьох режимів: нормального, повного використання пропускної здатності, короткого замикання в тяговій мережі.

У практиці проектування при розрахунку режиму системи електропостачання вузла зі звичайною або складною схемою живлення в нормальних умовах експлуатації визначаються такі параметри: середні значення струмів фідерів і плечей живлення тягових підстанцій; ефективні значення струмів фідерів і плечей живлення тягових підстанцій; добові витрати енергії по плечах живлення; добові втрати енергії.

Для режиму повного використання пропускної здатності (рух ЕРС максимального завантаження з мінімальним інтервалом руху) необхідно знати: максимальні значення струмів фідерів тягових підстанцій і постів секціонування (миттєві значення); максимальні значення ефективних струмів фідерів тягових підстанцій і постів секціонування (усереднені на 15-хвилинних інтервалах); середні струми фідерів і середні напруги на шинах тягових підстанцій за час ходу ЕРС по лімітуючій блок-ділянці; середню напругу на пантографі ЕРС за час ходу його по лімітуючій блок-ділянці.

Адекватність імітаційної моделі реальному процесу перевірялася за експериментальними даними електроспоживання тягових підстанцій, які

отримані від АСКОЕ на множині двоколіїних, одноколіїних ділянок і складних схем живлення електротягових мереж (рис. 9). Рівні напруги в

контактній мережі ділянок вимірювалися вагон-лабораторіями, пристроями цифрового захисту та автоматики постійного струму сучасних підстанцій.

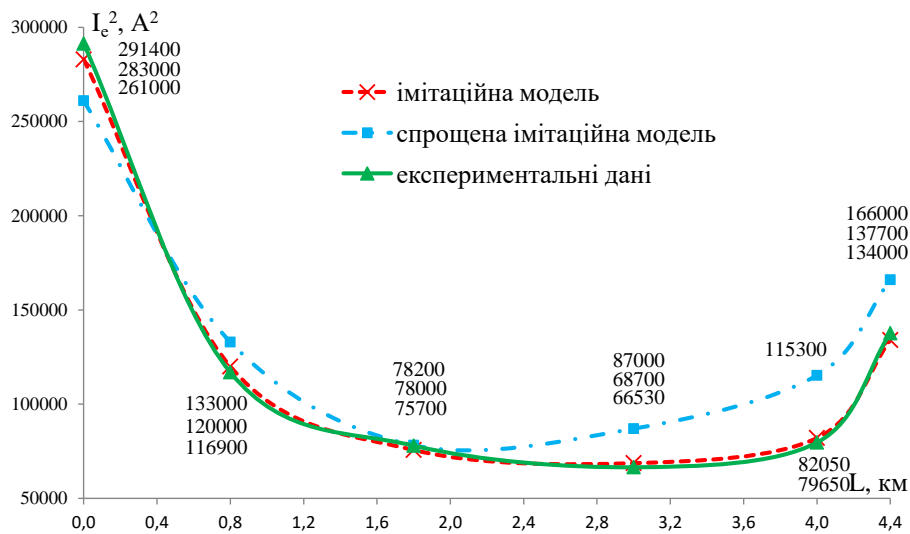


Рис. 9. Епюри середньоквадратичних струмів однієї колії типової міжпідстанційної зони з постом секціонування

Як видно з діаграм, спільне моделювання мереж зовнішнього і тягового електропостачання та оптимізаційні розрахунки при визначенні електротягових навантажень дозволили наблизитися до реального процесу роботи електротягових мереж. Так, при визначенні середньоквадратичних струмів похибка не перевищує 3 %. Похибка при визначенні інтегральних показників витрат і втрат енергії не перевищує 3–5 %. Така точність у визначенні показників цілком допустима при аналізі електроживлення в умовах експлуатації.

Висновки

Створені інформаційні бази параметрів електротягової мережі зі складними схемами живлення (питомі опори тягової мережі та зовнішньої системи електропостачання, навантаження трамваїв та троллейбусів) для моделювання режимів роботи ділянок міського електротранспорту. Встановлено, що функції розподілу фідера, що живить трамвайне депо відповідає логарифмічно нормальному закону, функції розподілу модулів відхилення напруги холостого ходу і кутів між напругами холостого ходу суміжних тягових підстанцій усіченому нормальному закону.

1. Розроблено алгоритми та імітаційні моделі систем тягового електропостачання міського електротранспорту з урахуванням режимів роботи енергосистем. Створено єдиний імітаційний комплекс, що враховує графіки руху трамваїв та троллейбусів, перетоки потужності в системах електропостачання, який дозволяє отримати узагальнюючі залежності перетоків потужності і втрат

енергії, та підвищити точність розрахунків електротехнічних параметрів до 5–7 %.

2. Адекватність імітаційної моделі реальному процесу перевірялася за експериментальними даними, які отримані від АСКОЕ АК «Харківобленерго» та сучасних вагон-лабораторій на множині двоколіїних, одноколіїних ділянок постійного струму електротягових мереж і складних схем живлення тягових підстанцій. Похибка при визначенні інтегральних показників витрат і втрат енергії не перевищує 3–5 %, а середньоквадратичних струмів – 2,5–3 %.

Література

1. Слепцов М.А. Основы электрического транспорта : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович, Т.И. Савина, В.Д. Тулунов ; под общ. ред. М.А. Слепцова. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
2. Правила експлуатації трамвая і троллейбуса з інформаційно-довідковими матеріалами / корп. «Укрелектротранс». – Харків : Золоті сторінки, 2020. – 256 с.
3. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1 / Под ред. К.Г. Марквардта. – М. : Транспорт, 1980. – 256 с.
4. Родько В.И. Электроснабжение городского электрического транспорта : учеб. пос. – Гомель : БелГУТ, 2006. – 112 с.
5. Корниенко В.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор) : моногр. / В.В. Корниенко, А.В. Котельников, В.Т. Доманский. – К. : Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
6. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги / Розенфельд В.Е., И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров ; под ред. И.П. Исаева. – М. : Транспорт, 1995. – 294 с.

7. Марквардт К.Г. *Электроснабжение электрифицированных железных дорог.* – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
8. *Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / под ред. В.А. Веникова.* – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 456 с.
9. Фигурнов Е.П. *Релейная защита : учеб. для студентов электротехнических и электромеханических спец. транспортных и других вузов.* – Киев : Транспорт Украины, 2004. – 565 с.
10. Доманський І.В. *Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями : моногр.* – Харків : вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. – 224 с.
11. Закарюкин В.П. *Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков.* – Иркутск : изд-во Иркутского ун-та, 2005. – 273 с.
12. Беллерт С. *Анализ и синтез электрических цепей методом структурных чисел / Беллерт С., Возняцки Г.* – М. : Мир, 1972. – 214 с.
13. Мельников Н.А. *Матричный метод анализа электрических цепей.* – М. : Энергия, 1966. – 216 с.
14. Тьюарсон Р. *Разреженные матрицы.* – М. : Мир, 1977. – 189 с.
15. Доманський І.В. *Перспективи розвитку електричних мереж зовнішнього електропостачання тягових підстанцій / І.В. Доманський, О.С. Козлова. // Комунальне господарство міст.* – 2020. – Вип. 1(154). – С. 8–15. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-8-15>
16. Мельников Н.А. *Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330 – 500 кВ / под общ. ред. С.С. Рокотяна.* Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1974. – 472 с.
17. Шидловский А.К. *Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения / Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г.* – К. : Наукова думка, 1987. – 174 с.
18. Пелисье Р. *Энергетические системы / Пелисье Рене ; пер. с франц.* – М. : Высш. шк., 1982. – 568 с.
19. Герман Л.А. *Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения.* – М. : РОСГУПС, 1998. – 36 с.
20. Железко Ю.С. *Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю.С. Железко.* – М. : ЭНАС, 2009. – 456 с.
21. Аржанников Б.А. *Совершенствование системы электропитания постоянного тока на основе автоматического регулирования тяговых подстанций / Аржанников Б.А., Пышкин А.А.* – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. ун-та путей сообщения. – 2006. – 118 с.
22. Yagup V. *Analysis and optimization of the reactive power compensation modes in a power supply system / V. Yagup, K. Yagup, Yu. Kovalova, V. Kharchenko, T. Besarab, O. Krasnov, I. Domanskii, V. Domanskii, H. Kostin, H.G. AbuGoukh // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2019. – Is. 3/5 (99). – P. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168584>
23. Marquardt K.G. *Textbook.* Moscow, Publishing Center "Academy". [in Russian]
24. *Rules for the operation of trams and trolleybuses with information and guidance materials.* (2020). Corp. "Ukrelektrotrans". Kharkiv, Golden sides. [in Ukrainian]
25. *Handbook of railway power supply.* (1980). Vol.1. By ed. K.G. Marquardt. Moscow, Transport. [in Russian]
26. Rodko, V.I. (2006). *Power supply of urban electric transport.* Textbook. Gomel, BelGUT. [in Russian]
27. Kornienko, V.V., Kotelnikov, A.V., and Domansky, V.T. (2004). *Railway electrification. World Trends and Prospects (Analytical Review).* Monograph. Kyiv, Transport of Ukraine. [in Russian]
28. Rosenfeld, V.E., Isaev, I.P., Sidorov, N.N., Ozerov, M.I. (1995). *Theory of electric traction.* Ed. by I.P. Isaeva. Moscow, Transport. [in Russian]
29. Marquardt, K.G. (1982). *Power supply of electrified railways.* 4th ed. Moscow, Transport. [in Russian]
30. *Electric power systems in examples and illustrations.* (1983). Ed. by Venikova V.A. Moscow, Energoatomizdat. [in Russian]
31. Figurnov, E.P. (2004). *Relay protection.* Textbook. Kyiv, Transport of Ukraine. [in Russian]
32. Domansky, I.V. (2016). *Fundamentals of energy efficiency of electrical systems with traction traction.* Monograph. Kharkiv, TOV "Center of Information for Transport of Ukraine". [in Ukrainian]
33. Zakaryukin, V.P., Kryukov, A.V. (2005). *Complicated asymmetrical modes of electrical systems.* Irkutsk, Irkutsk University Press. [in Russian]
34. Bellert, S., Wozniacki, G. (1972). *Analysis and synthesis of electrical circuits by the method of structural numbers.* Moscow, Mir. [in Russian]
35. Melnikov, N.A. (1966). *Matrix method for the analysis of electrical circuits.* Moscow, Energy. [in Russian]
36. Tewarson, R. (1977). *Sparse matrices.* Moscow, Mir. [in Russian]
37. Domanskyi, I., Kozlova, O. (2020). *Development prospects of external power supply electrical networks of traction substations.* *Municipal economy of cities*, 1(154), 8–15. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-8-15> [in Ukrainian]
38. Melnikov, N.A. (1974). *Design of the electrical part of overhead power lines 330 – 500 kV.* By ed. S.S. Rokotyan. Ed. 2nd. Moscow, Energy. [in Russian]
39. Shidlovsky, A.K., Kuznetsov, V.G., Nikolaenko, V.G. (1987). *Optimization of asymmetric modes of power supply systems.* Kyiv, Naukova Dumka. [in Russian]
40. René, P. (1982). *Energy systems.* Transl. from French. Moscow, Higher School. [in Russian]
41. German, L.A. (1998). *Matrix methods for calculating the traction power supply system.* Moscow, ROSGUPS. [in Russian]
42. Zhelezko, Yu.S. (2009). *Loss of electricity. Reactive power. Electricity quality.* Moscow, ENAS. [in Russian]
43. Arzhannikov, B.A., Pyshkin, A.A. (2006). *Improving the DC power supply system based on automatic control of traction substations.* Yekaterinburg, Publishing house of the Ural State University of Communications. [in Russian]
44. Yagup, V., Yagup, K., Kovalova, Yu., Kharchenko, V., Besarab, T., Krasnov, O., Domanskii, I., Domanskii, V., Kostin, V., AbuGoukh H.G. (2019). *Analysis and optimization*

References

1. Sleptsov, M.A., Dolaberidze, G.P., Prokopovich, A.V., Savina, T.I., Tulupov, V.D. (2006). *Fundamentals of electric*

of the reactive power compensation modes in a power supply system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8(99)), 13–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168584>

Рецензент: д-р техн. наук, професор В.Х. Далека, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: ДОМАНСЬКИЙ Валерій Тимофійович
доктор технічних наук, професор кафедри
електричного транспорту
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – dyt.nord@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6676-0780>

Автор: ДОМАНСЬКИЙ Ілля Валерійович
доктор технічних наук, доцент кафедри
електричного транспорту
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – i.domanskiy@dakenergo.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-410X>

Автор: ШАВКУН Вячеслав Михайлович
кандидат технічних наук, доцент кафедри
електричного транспорту
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – vm.shavkun@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3253-1282>

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR STUDYING PARAMETERS FOR SIMULATING COMPLEX SCHEMES OF ELECTRICAL SUPPLY OF ELECTRICAL TRANSPORT TRACTION NETWORKS

V. Domanskyi, I. Domanskyi, V. Shavkun

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The parameters of complex power supply schemes of tram lines, which are required for simulation modeling, were studied: statistical characteristics of traction loads of feeders and voltage on the tires of traction substations. It was established that the distribution function of the feeder feeding the tram depot corresponds to the logarithmic normal law, the distribution function of the modules of the idle voltage deviation and the angles between the idle voltages of adjacent traction substations to the truncated normal law. It is proposed to modernize the information bases of electric traction network parameters with complex power schemes to increase the efficiency of modeling the modes of operation of sections of urban electric transport.

A method of calculating instantaneous schemes has been developed, which allows to create algorithms that do not depend on the degree of complexity of the scheme. A method of simulation modeling of complex power supply systems of electric transport based on the synthesis of the matrix method of calculating instantaneous circuits and the method of statistical tests for modeling the organization of traffic of trams and trolleybuses is proposed.

Algorithms and simulation models of traction power supply systems of urban electric transport have been developed, taking into account the modes of operation of power systems. A single simulation complex has been created that takes into account the traffic schedules of trams and trolleybuses, power flows in power supply systems, which makes it possible to obtain generalized dependences of power flows and energy losses, and to increase the accuracy of calculations of electrical parameters to 5–7%.

Adequacy of the simulation model to the real process was verified by experimental data on a number of two-track, single-track sections of electric traction networks and complex power supply schemes of traction substations. The error in determining the integral indicators of costs and energy losses does not exceed 5%, and the rms currents – 3%.

The use of simulation modeling in the design of traction power supply systems allows to improve the quality of electrical engineering calculations of complex power supply schemes and to propose energy-efficient power supply modes.

Keywords: electric transport, traction substations, electric traction networks, complex power supply systems, energy efficiency of modes.