

УДК 621.331

Д. О. БОСИЙ, канд. техн. наук, доцент, докторант ДНУЗТ,
Дніпропетровськ

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

В статті розглянуто питання виконання розрахунків систем тягового електропостачання в якості складної системи, в якій вимагається враховувати багато різноманітних факторів. Запропоновано методику просторово-часового розрахунку систем тягового електропостачання, яка представляє собою аналітичне описання основних електричних процесів кусочно-заданими функціями двох змінних. Запропоновану методику можна використати до оптимізаційних розрахунків та визначення керуючого впливу при посиленні систем тягового електропостачання або застосуванні підходів керованого електропостачання.

Ключові слова: електрична тяга, система електропостачання, розрахунок, модель, простір, час, графік руху, схема живлення, контактна мережа.

Вступ. Система тягового електропостачання електрифікованих залізниць є складною системою, для розрахунку якої в залежності від поставленої задачі вимагається враховувати багато різноманітних факторів, від яких будуть залежати обрані методи і способи розрахунку та які, в свою чергу, будуть впливати на об'єми та швидкість розрахунку.

Зазвичай моделі системи тягового електропостачання застосовуються або для отримання числових характеристик електричних величин при проектуванні ділянки електрифікованої залізниці або для оптимізації режимів роботи існуючих ділянок, чи при впровадженні нових пристроїв електропостачання чи для аналізу ефективності, а в окремих випадках, і при виникненні ненормальних режимів експлуатації.

Таким чином, на етапі проектування ділянок необхідні моделі для розрахунку проектних показників систем тягового електропостачання стосовно режимів напруги, втрат потужності, ККД, пропускну здатності ділянки, тощо. За наявності резервів чи невизначеностей на цьому етапі можливе використання оптимізаційних розрахунків стосовно вибору чи коригування параметрів системи тягового електропостачання з метою покращення показників роботи.

На етапі експлуатації моделі можуть застосовуватись для оптимізації режимів напруги з врахуванням особливостей систем зовнішнього електропостачання, розрахунку наявних показників систем тягового електропостачання з подальшим вибором варіантів підсилення чи коригування обраних на етапі проектування параметрів, аналізу ефективності роботи ділянок електрифікованих залізниць на підставі обробки великих масивів експериментальних даних, проведення повнофакторних експериментів та узагальнення результатів.

Широкого розповсюдження набули спеціалізовані розробки засобів моделювання систем тягового електропостачання:

Nord, Fazonord, Flow3, Fazonord-Расчеты, Fazonord-Качество (Крюков А. В., Закарюкін В. П.), Іркутського державного університету шляхів сполучення [1];

КОРТЕС (Марський В. Є.), Науково-дослідний інститут залізничного транспорту (ВНДІЗТ) [2];

ведуться також і розробки Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту, зокрема

PrEns (Савіч Я. Ю.) з подальшим розвитком в роботах [3-5];

Матрікс (Мицко Р.С.) [6] з подальшим розвитком в систему Поток (Калашников К. О) [7].

Деякі науковці при моделюванні окремих режимів роботи систем тягового та зовнішнього електропостачання використовують універсальні засоби моделювання OrCAD, TCAD, MatLAB, LabView, які мають

потужні бібліотеки моделювання пристроїв загальної енергетики, та в яких нажалі проблемно врахувати повністю специфіку систем тягового електропостачання.

З аналізу слідує, що найбільш узагальнюючим є отримання результатів в просторово-часових координатах, без яких неможливе виконання оптимізаційних розрахунків системи тягового електропостачання. Саме просторово-часове уявлення всіх електричних величин, які необхідні для розрахунків систем тягового електропостачання, дозволяє побудувати інтелектуальні системи керування режимами систем тягового електропостачання.

Постановка задачі. Необхідно розробити модель, яка на підставі вихідних даних у вигляді графіку руху, тягових розрахунків або режимних карт, схеми живлення та секціонування ділянки, даних режимів напруги системи зовнішнього електропостачання дозволить виконувати електричні розрахунки системи тягового електропостачання в просторово-часових координатах, які включають в себе функції розподілу струму, спаду напруги та втрат потужності в контактній мережі, оптимізаційні розрахунки, які складаються з пошуку оптимального рівня напруги на кожній тяговій підстанції, пошук кількості та місця встановлення підсилюючих пунктів, пошук закону управління керованими підсилюючими пунктами, закони управління пристроями компенсації реактивної потужності на змінному струмі, розрахунки параметрів режиму системи електропостачання, а саме показники якості електричної енергії, величини напруги, струму, кутів зсуву фаз на тягових підстанціях, втрати в елементах системи електропостачання.

Розроблена модель повинна реалізовуватись у вигляді програмного комплексу, який виконуватиме розрахунок режимних показників системи тягового електропостачання для залізниць постійного та змінного струму, а саме значень фідерних і первинних струмів, розподілу струмів в контактній мережі, втрат напруги, потужності, витрат електричної енергії та основних показників якості електроенергії в системі тягового електропостачання з врахуванням технічних засобів поліпшення якості електричної енергії; виконання оптимізаційних розрахунків оптимальних параметрів системи тягового електропостачання та визначення законів управління технічними засобами з метою підвищення ефективності режиму роботи системи тягового електропостачання.

Основна частина. Просторово-часова модель системи тягового електропостачання ґрунтується на аналітичному описі основних електричних процесів функціями двох змінних, взаємозв'язок між якими визначається графіком руху поїздів $x_T(n, t)$ (рис. 1), що визначає графікову координату кожного окремого поїзду з номер n у будь-який момент

часу t . Використовуючи інші вихідні у вигляді профілю потужності електровозу, параметрів системи зовнішнього та тягового електропостачання визначаються кусочно-задані функції двох змінних, які являють собою залежності розподілу струмів та втрат напруги в контактній мережі у часі та просторі.

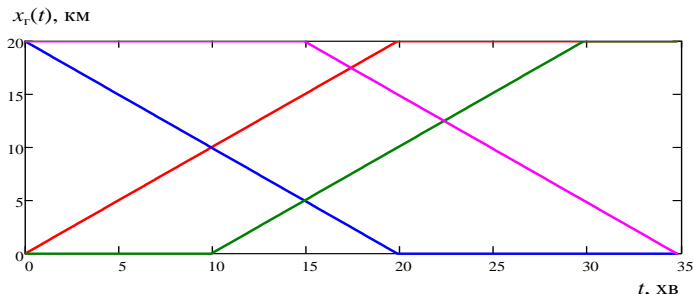


Рис. 1 – Розрахунковий графік руху поїздів

Струм фідера без врахування вирівнювального струму визначається як добуток відповідної функції струморозподілу на струм поїзду в поточній координаті x . Для двосторонньої схеми

$$I_{\Phi 1}(x) = I \frac{L-x}{L}; \quad I_{\Phi 2}(x) = I \frac{x}{L}.$$

де L – довжина ділянки, км.

Вузлова схема живлення характеризується струморозподілом

$$I_{\Phi 1}(x) = I \times \begin{cases} 1 - \frac{L+l_c}{2Ll_c}x, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{1}{2}\left(1 - \frac{x}{L}\right), & l_c \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\Phi 2}(x) = I \times \begin{cases} \frac{L-l_c}{2Ll_c}x, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{1}{2}\left(1 - \frac{x}{L}\right), & l_c \leq x \leq L; \end{cases}$$

$$I_{\Phi 3}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_c; \\ 1 - \frac{(2L-l_c)(L-x)}{2L(L-l_c)}, & l_c \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\Phi 4}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{l_c(L-x)}{2L(L-l_c)}, & l_c \leq x \leq L; \end{cases}$$

де l_c – розташування поста секціонування, починаючи від першої підстанції, км.

Струми фідерів у часі (рис. 2) визначаються суперпозицією окремих часток від кожного поїзду відповідно до графіку руху з врахуванням вирівнювального струму. Для скорочення в подальшому приводяться викладки для непарного фідера першої підстанції та для парного наступної, тобто

$$I_{\Phi 1}(t) = \sum_{i=1}^{n_1} \varphi_1(x_T(2i-1, t)) I_{\Pi}(2i-1, t) + \sum_{i=1}^{n_2} \varphi_2(x_T(2i, t)) I_{\Pi}(2i, t) + I_{\text{вир}}(t);$$

$$I_{\Phi 4}(t) = \sum_{i=1}^{n_1} \varphi_4(x_T(2i-1, t)) I_{\Pi}(2i-1, t) + \sum_{i=1}^{n_2} \varphi_3(x_T(2i, t)) I_{\Pi}(2i, t) - I_{\text{вир}}(t),$$

де $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – функції струморозподілу відповідно до номеру фідера першої (1, 2) та наступної (3, 4) тягової підстанції;

$I_{\Pi}(n, t)$ – функція результатів тягових розрахунків для поїзду з номером n у момент часу t ;

$2i-1, 2i$ – визначають номери непарного та парного поїзду;

n_1, n_2 – кількість поїздів відповідно на першій та другій колії.

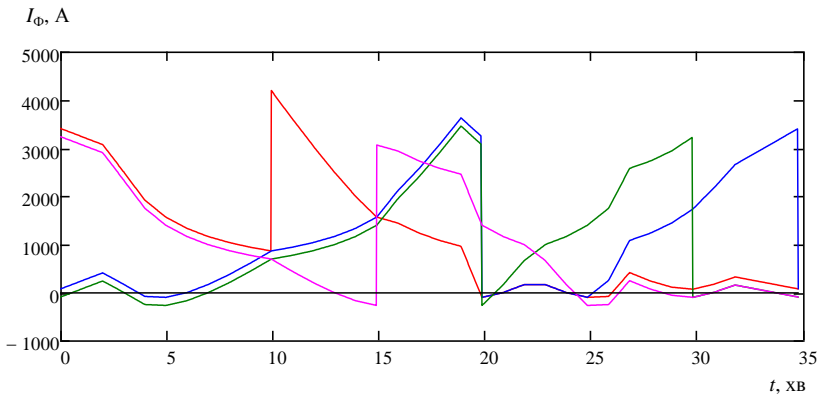


Рис. 2 – Результати розрахунку струмів фідерів

За допомогою отриманих струмів фідерів та графіку руху поїздів визначається функція розподілу струмів в контактній мережі. Для цього спочатку визначається струморозподіл у заданій схемі живлення від одного навантаження, наприклад для першої колії вузлової схеми живлення

$$I_{KI}(n, t, x) = \begin{cases} \begin{cases} I_{\Phi_1}(n, t), x \in [0; x_{\Gamma}(n, t)]; \\ -[I_{\Phi_2}(n, t) + I_{\Phi_3}(n, t) + I_{\Phi_4}(n, t)], x \in (x_{\Gamma}(n, t); l_C]; \\ -I_{\Phi_3}(n, t), x \in (l_C; L]; \\ x_{\Gamma}(n, t) \in [0; l_C]; \end{cases} \\ \\ \begin{cases} I_{\Phi_1}(n, t), x \in [0; l_C]; \\ I_{\Phi_1}(n, t) + I_{\Phi_2}(n, t) + I_{\Phi_4}(n, t), x \in (l_C; x_{\Gamma}(n, t)]; \\ -I_{\Phi_3}(n, t), x \in (x_{\Gamma}(n, t); L]; \\ x_{\Gamma}(n, t) \in (l_C; L]; \\ n = 2i - 1; \end{cases} \\ \\ \begin{cases} I_{\Phi_1}(n, t), x \in [0; l_C]; \\ -I_{\Phi_3}(n, t), x \in (l_C; L]; \\ n = 2i. \end{cases} \end{cases},$$

Тут $I_{\Phi_1}(n, t) \dots I_{\Phi_4}(n, t)$ – струм кожного фідера (1.4) від поїзда з номером n у момент часу t .

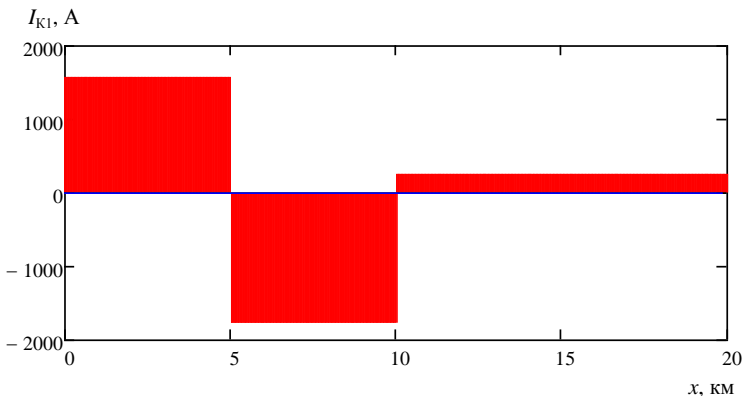


Рис. 3 – Розподіл струмів в контактній мережі в момент часу $t = 5$ хв

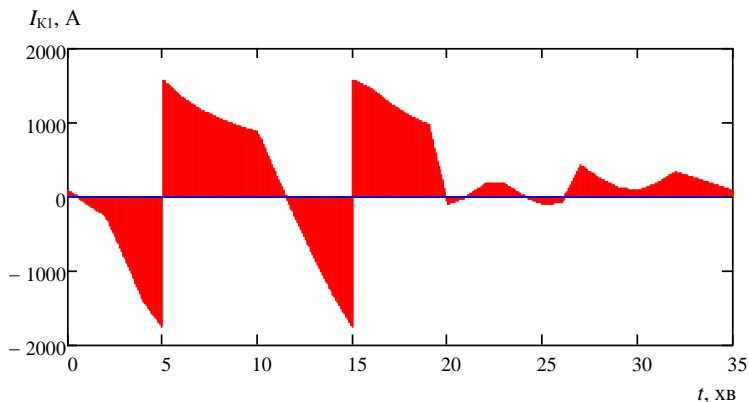


Рис. 4 – Часова залежність струму в контактній мережі для координати $x=5$ км

Далі за допомогою принципу суперпозиції визначається розподіл струмів в контактній мережі від усіх поїздів та з врахуванням вирівнювальних струмів. Наприклад, для контактної мережі першої колії

$$I_{K1}(t, x) = \sum_{i=1}^{n_1} I_{K1}(2i-1, t, x) + \sum_{i=1}^{n_2} I_{K1}(2i, t, x) + I_{\text{вир}}(t).$$

Визначення функції розподілу втрат напруги передбачає використання функції розподілу струмів в контактній мережі з накопичуючим домноженням на відповідну відстань та питомий опір мережі. При накопиченні використовується рекурсивний підхід, тобто визначення розподілу втрат напруги наступного інтервалу використовує втрату напруги попереднього. Формалізований запис функції розподілу втрат напруги в контактній мережі першої колії матиме вигляд

$$\Delta U_{K1}(n, t, x) =$$

$$= r_0 \times \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n, t, x) \cdot x, x \in [0; x_{\Gamma}(n, t)]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, x_{\Gamma}(n, t)) + I_{K1}(n, t, x)(x - x_{\Gamma}(n, t)), x \in (x_{\Gamma}(n, t); l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, l_C) + I_{K1}(n, t, x)(x - l_C), x \in (l_C; L]; \\ x_{\Gamma}(n, t) \in [0; l_C]; \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n, t, x) \cdot x, x \in [0; l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, l_C) + I_{K1}(n, t, x)(x - l_C), x \in (l_C; x_{\Gamma}(n, t)]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, x_{\Gamma}(n, t)) + I_{K1}(n, t, x)(x - x_{\Gamma}(n, t)), x \in (x_{\Gamma}(n, t); L]; \\ x_{\Gamma}(n, t) \in (l_C; L]; \end{array} \right. \\ n = 2i - 1; \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n, t, x) \cdot x, x \in [0; l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, l_C) + I_{K1}(n, t, x)(x - l_C), x \in (l_C; L]; \end{array} \right. \\ n = 2i. \end{array} \right. ,$$

За аналогією з функцією розподілу струмів в контактній мережі визначається розподіл втрат напруги в контактній мережі від усіх поїздів та з врахуванням впливу вирівнювальних струмів, а саме

$$\Delta U_{K1}(t, x) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta U_{K1}(2i-1, t, x) + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta U_{K1}(2i, t, x) + I_{\text{вир}}(t) \cdot r_0 \cdot x.$$

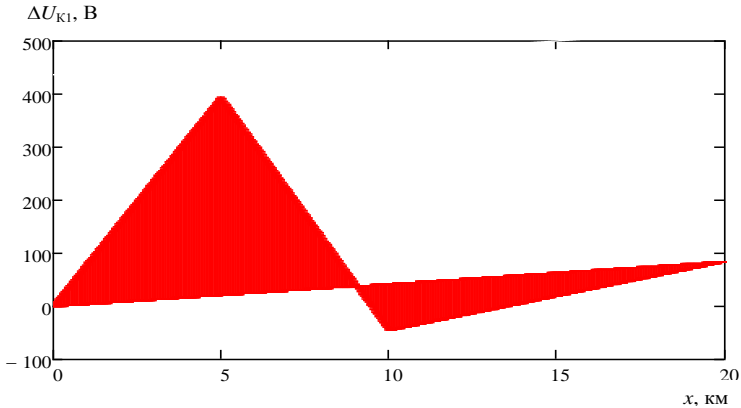


Рис. 5 – Розподіл втрат напруги в контактній мережі в момент часу $t = 5$ хв

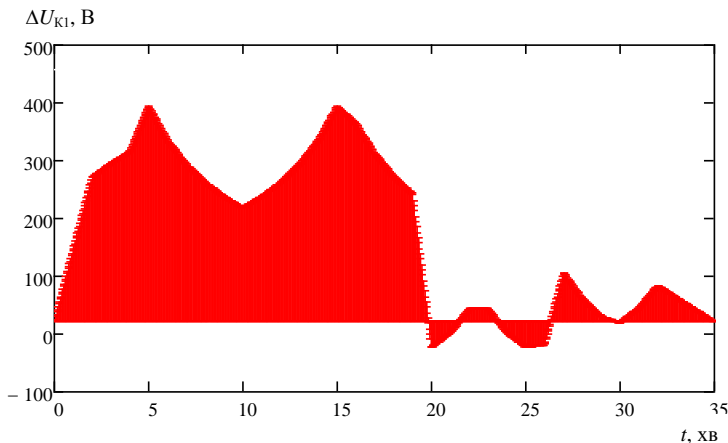


Рис. 6 – Часова залежність x = втрати напруги в контактній мережі для координати 5 км

Добуток за модулем просторово-часових функцій розподілу втрат напруги та струмів в контактній мережі визначає розподіл втрат потужності

$$\Delta P_K(t, x) = |I_{K1}(t, x) \cdot \Delta U_{K1}(t, x)| + |I_{K2}(t, x) \cdot \Delta U_{K2}(t, x)|.$$

Інтегрування функції розподілу втрат потужності за координатою простору визначає миттєві значення втрат потужностей в системі електропостачання, а за координатою часу – розподіл втрат електроенергії уздовж розрахункової ділянки. Подвійне інтегрування функції розподілу втрат потужності визначає втрати електроенергії на розрахунковий ділянку за період розрахунку.

$$\Delta P_K(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx; \quad \Delta P_K(x) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P_K(t, x) dt;$$

$$\Delta W = \frac{1}{L \cdot T} \int_0^T \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx dt.$$

Реалізація та робота алгоритму. Приведені математичні викладки реалізовані у вигляді алгоритму в середовищі MathCAD та в окремій системі розрахунків *iSET*, написаної в середовищі Delphi.

Перед початком роботи створиться схема живлення ділянки тягової мережі, для якої необхідно виконати розрахунки, а також задаються вихідні дані, а саме: рід струму яким електрифікована ділянка, схема живлення, графік руху поїздів на підставі часу ходу ділянкою та моме-

нту відправлення, довжина у кілометрах обраної ділянки, тип тягової мережі, рівень напруги на підстанціях, струмові навантаження, що споживаються електровозами та їх кількість для кожної колії.

Програма передбачає три режими роботи:

- 1) загальний розрахунок системи тягового електропостачання;
- 2) параметричної оптимізації;
- 3) оптимізації керуванням.

Користувачу доступне проведення загального розрахунку (рис. 7), після чого можливе виконання оптимізаційних розрахунків. Результати розрахунків відображаються у вигляді графіків струмів фідерів тягових підстанцій, напруги на струмоприймачах електровозів та втрат потужності в тяговій мережі, епюр струму, втрат напруги та потужності в тяговій мережі.

При оптимізації користувач, після проведення загального розрахунку, задає граничні умови, наприклад, за рівнем напруги. Система перевіряє відповідність отриманих результатів заданим умовам, і, якщо розрахункові дані відповідають їм, то система приймає рішення, що оптимізація не потрібна і завершує розрахунок. Якщо отримані результати не відповідають поставленим умовам, то система переходить до вибору одного з варіантів оптимізації.

При параметричній оптимізації коригуються параметри системи електропостачання, тобто вихідна потужність тягових підстанцій, площа поперечного перерізу контактної мережі, довжина міжпідстанційних зон, розташування постів секціонування та пунктів паралельно-го з'єднання.

В режимі оптимізації керуванням проводиться розрахунок для двох варіантів: підсилення системи тягового електропостачання встановленим підсилюючих пунктів та стабілізації напруги в контактній мережі.

При підсиленні системи тягового електропостачання шляхом встановлення на міжпідстанційній зоні пунктів підсилення спочатку проводиться визначення місця на розрахунковій ділянці з мінімальним значенням напруги на струмоприймачі електровозу для підключення підсилюючого пункту. Після чого визначається різниця напруги між встановленим і отриманим значенням та струм підсилення необхідний для компенсації цієї різниці. Далі проводиться розрахунок аналогічний загальному, але з урахуванням струму підсилюючого пункту в тяговій мережі. В результатах розрахунку додатково відображається струм підсилюючого пункту.

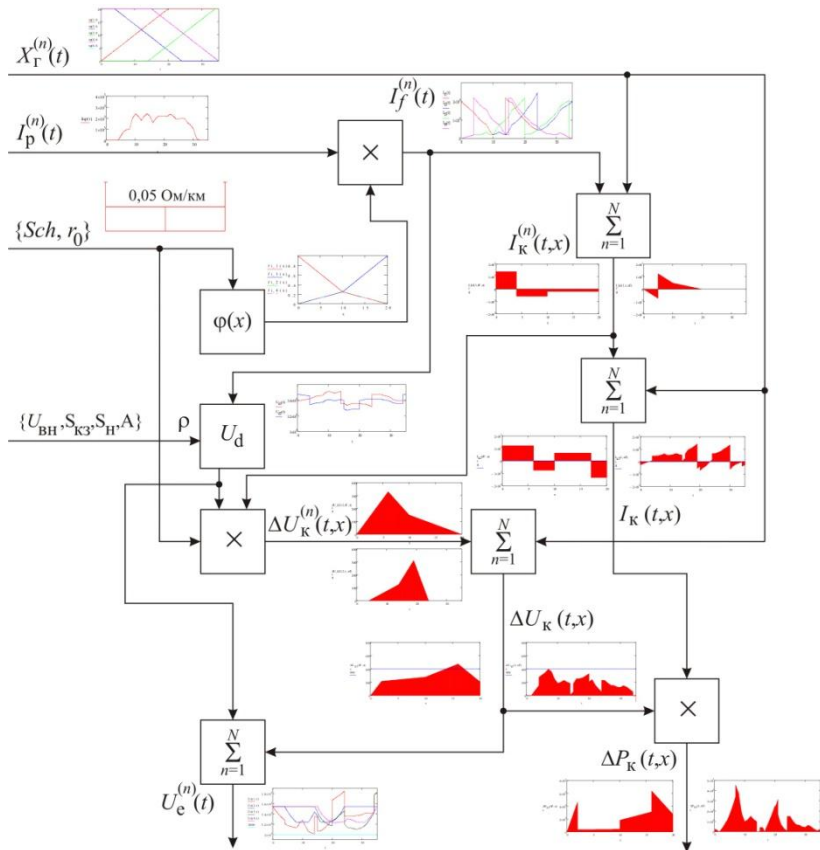


Рис. 7 – Узагальнена структура просторово-часової моделі

В результаті роботи в режимі оптимізації користувач може отримати відповідь у вигляді оптимальних варіантів підсилення системи тягового електропостачання: потужності тягових підстанцій, типу контактної мережі, відстані між тяговими підстанціями, місць установки і струмів пунктів підсилення, струму керування системою стабілізації напруги. Також програма будує графіки фідерних струмів, напруг на струмоприймачах електровозів, втрати потужності, епюри струмів та втрат напруги в контактній мережі на основі отриманих результатів.

В якості ілюстрації роботи розробленої моделі на рис. 8 приведено приклад вирішення задачі стабілізації напруги на струмоприймачеві

при розподіленому живленні із застосуванням закону керування підсилюючим пунктом.

Порівняння втрат електроенергії для розглянутого випадку стабілізації напруги вказує на економію електричної енергії величиною до 30 %.

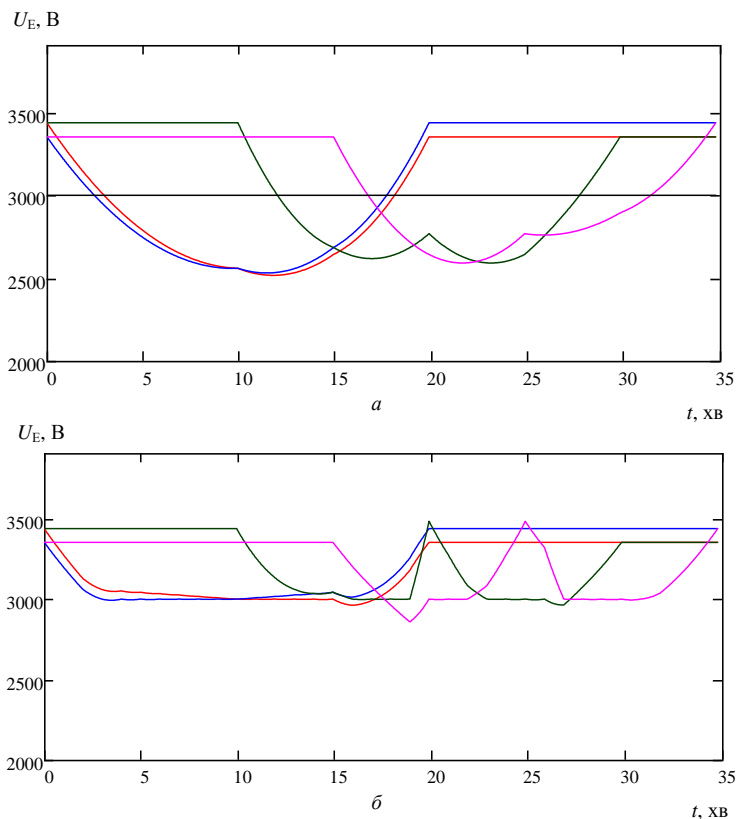


Рис. 8 – Графіки напруги на струмоприймачах:
a – вихідний розрахунок; *б* – для стабілізації напруги

Висновки. Розрахунки систем тягового електропостачання в якості складної системи з вархуванням багатьох різноманітних факторів доцільно виконувати в просторово-часових координатах.

Розроблена методика просторово-часового розрахунку систем тягового електропостачання ґрунтується на аналітичних кусочно-заданих функціях двох змінних, а саме розподілу струмів та втрат напруги в

контактній мережі, дозволяє проводити оптимізаційні розрахунки чи розрахунки керуючого впливу при посиленні систем тягового електропостачання або застосуванні підходів керованого електропостачання.

Список літератури: 1. *Крюков А. В.* Компьютерные технологии для моделирования систем электроснабжения железных дорог переменного тока / *А. В. Крюков, В. П. Закарыкин* // Транспорт Российской Федерации, 2010. – № 3 (28). – С. 61-65. 2. *Герман Л. А.* Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети / *Л. А. Герман, К. В. Кишкурно* // Вестник ВНИИЖТ, 2013. – № 1. – С. 16-21. 3. *Бобирь Д. В.* Удосконалення режимів ведення вантажного поїзда з електричною тягою: авт. дис. к. т. н. / *Д. В. Бобирь*. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – 22 с. 4. *Іванов О. П.* Удосконалення режимів тяги поїздів за вартісними показниками при змінних тарифах на електроенергію: авт. дис. к. т. н. / *О. П. Іванов*. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2013. – 24 с. 5. *Кузнецов В. Г.* Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму: авт. дис. д. т. н. / *В. Г. Кузнецов*. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2012. – 38 с. 6. *Кузнецов В. Г.* Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / *В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босый* // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2006. – Вип. 12. – С. 36-40. 7. *Калашиников К. О.* Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень: авт. дис. к. т. н. / *К. О. Калашиников*. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2014. – 20 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. *Komp'yuternye tekhnologii dlya modelirovaniya sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka*. Transport of the Russian Federation, 2010, No. 3(28), .61-65. 2. German L. A., Kishkurno K. V. *Sravnenie metodov rascheta sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya pri raznykh sposobakh ucheta parametrov vneshney seti*. VNIIZhT Bulletin, 2013, No. 1, 16-21. 3. Bobyr D. V. *Udoskonalennya rezhimiv vedennya vantazhnogo poyizda z elektrichnoyu tyagoyu*. Dnipropetrovsk, DNURT Publ., 2007, 22 . 4. Ivanov O. P. *Udoskonalennja rezhymiv tjagy poi'zdiv za vartisnymy pokaznykamy pry zminnyh taryfah na elektroenergiyu*. Dnipropetrovsk, DNURT Publ., 2013, 24 . 5. Kuznetsov V. G. *Rozvytok teoretychnyh osnov energozberezhenija v sistemah elektropostachannja tjagy poi'zdiv postijnogo strumu*. Dnipropetrovsk: DNURT Publ., 2012, 38 . 6. Kuznetsov V. G., Mytsko R. S., Bosiy D. A. *Otsenka poter elektroenergii v tyagovoy seti magistral'nykh zheleznykh dorog*. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2006, No. 12, . 36-40. 7. Kalashnikov K. O. *Zmenshennja vtrat elektroenergii v tjavovij merezhi postijnogo strumu shljahom vyboru racional'noyi dyslokatsii tjavovyh navantazhen*. Dnipropetrovsk: DNURT Publ., 2014, 20 .