

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ ЗМІННОГО СТРУМУ

У статті проаналізовано існуючі методи розрахунку електромагнітних процесів в системах тягового електропостачання змінного струму. Запропоновано досліджувати електромагнітні процеси сучасними методами імітаційного моделювання. Отримано вираз для розрахунку функцій струморозподілу за допомогою матричного методу. Приведено послідовність виконання імітаційного моделювання.

В статье проанализированы существующие методы расчета электромагнитных процессов в системах тягового электроснабжения переменного тока. Предложено исследовать электромагнитные процессы современными методами имитационного моделирования. Получено выражение для расчета функций токораспределения с помощью матричного метода. Приведена последовательность выполнения имитационного моделирования.

The existing methods of calculation of electromagnetic processes in the systems of traction AC power supply have been analyzed. The modern simulation methods for studying the electromagnetic processes have been proposed. The expression for calculation of current distribution functions by means of matrix algebra has been obtained. The sequence of simulation modeling has been presented.

На залізницях України, електрифікованих за системою змінного струму 27,5 кВ, як правило, застосовується електрорухомий склад з перетворювачами однофазного змінного струму в постійний. Перетворювачі, в свою чергу, живляться електричною енергією від системи зовнішнього електропостачання через систему тягового електропостачання. Безпеку руху на залізницях забезпечує система сигналізації, централізації та блокування (СЦБ). Таким чином, з точки зору електромагнітної сумісності робота системи електрифікованого транспорту являє собою взаємодію чотирьох підсистем – підсистем зовнішнього і тягового електропостачання, електрорухомого складу та підсистем СЦБ. Перетворювачі електрорухомого складу є нелінійними, змінними в часі та просторі споживачами. Як відомо, будь-який нелінійний та змінний у часі споживач є джерелом погіршення якості електричної енергії [1]. В свою чергу, якість електричної енергії впливає на стан електромагнітної сумісності вищевказаних підсистем. Для забезпечення електромагнітної сумісності цих підсистем необхідно жорстко нормувати та контролювати показники якості електричної енергії тягових споживачів.

Оскільки досить складною є постановка експериментальних досліджень на діючих ділянках залізниць, тому вивчення електромагнітних процесів пропонується сучасними методами імітаційного моделювання системи тягового

електропостачання змінного струму з урахуванням специфіки роботи залізничного транспорту та вимог до якості електричної енергії.

Для розрахунку показників якості електроенергії необхідно розглядати більш складну схему заміщення системи тягового електропостачання змінного струму, що дозволяє визначати параметри хвильових процесів у тяговій мережі. Відомо, що хвильові процеси виникають внаслідок накладання коливань, викликаних перехідними процесами, що в свою чергу спричинені комутацією напівпровідникових пристроїв перетворювальних агрегатів електровозів [2–4].

В науковій літературі сформувались два основних напрями розрахунку систем тягового електропостачання змінного струму, які є колами змінного несинусоїдного струму з розподіленими нелінійними параметрами.

Перший напрям [5] базується на застосуванні модифікованого перетворення Лапласа, який дозволяє отримати результат розрахунку у вигляді рядів Фур'є без застосування формул розкладання. В цьому методі миттєві величини напруги і струму розглядаються функціями двох змінних: координати та часу. Причому по змінній координат застосовується пряме одностороннє перетворення Лапласа, а по змінній часу – перетворення Лапласа з кінцевими границями. Перше перетворення призводить до застосування інтегралу згортання, а друге до

зволяє результат розв'язку одразу виразити у вигляді масиву окремих гармонійних складових.

Другий напрям [2, 6] базується на визначенні активних та обмінних характеристик пасивного споживача електричної енергії, виходячи з фізичної сутності процесів споживання та обміну електричною енергією в системі тягового електропостачання змінного струму. При такому підході за заданими вхідними залежностями миттєвих струмів і напруги визначаються параметри схеми заміщення та встановлюються залежності зміни цих параметрів у часі, що називаються активними та обмінними характеристиками. Дослідження різноманітних станів електричних кіл та протікаючих в цих колах енергетичних процесів виконуються із застосуванням миттєвої форми виразів змінних електричних величин.

На першому етапі створення такої імітаційної моделі, що дозволить вивчати електромагнітні процеси в системі тягового електропостачання змінного струму за методами модифікованого перетворення Лапласа та активних і обмінних характеристик, необхідно дослідити миттєву схему розв'язувати для основної гармонійної складової в квазіусталеному режимі на кожному кроці моделювання. З точки зору універсальності, тобто для розв'язання схеми живлення будь-якої складності, найбільш завершеним є матричний метод аналізу електричних кіл. Для розрахунку показників якості електроенергії миттєві схеми необхідно розв'язувати з дискретизацією в часі щонайменше 0,02 с, що відповідає періоду основної гармонійної складової.

Нормативним документом ГОСТ 13109-97 для засобів вимірювальної техніки встановлено вимогу для коефіцієнту спотворення синусоїдності кривої напруги, яка відповідає дискретизації в часі 0,33 с, оскільки для визначення усередненого значення на інтервалі 3 с необхідно щонайменше 9 значень [7]. Тому основною задачею даної роботи є отримання універсального методу розрахунку систем тягового електропостачання змінного струму з мінімальними затратами часу для електронно-обчислювальних машин.

Застосування матричного методу до розрахунку розгалужених схем живлення тягової мережі передбачає послідовне складання та обернення матриць на кожному кроці імітаційного моделювання. Так, тривалість розрахунків, результати яких використано в статті [8], з дискретизацією в часі 1 хв. складала близько 2 діб.

Значна частина машинного часу використовується саме на виконання матричної операції обернення у виразі для визначення вектору струму в кожній вітці графа згідно [9]:

$$I_{\text{в}} = \begin{pmatrix} M \\ N \cdot Z \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} J \\ N \cdot E \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де M , N – перша та друга матриці інцидентії; Z – матриця повних власних опорів кожної вітки графа та опорів взаємодукції; J , E – вектори задаючих струмів та напруг у графі схеми.

Для швидкого розрахунку миттєвих схем застосуємо метод функцій струморозподілу, який полягає у визначенні значень функції струморозподілу $\varphi(x)$ в кожній точці з координатою x тягової мережі, кожне значення якої, в свою чергу, показує частку струму електровозу $I_{\text{е}}$, що споживається фідером контактної мережі $I_{\text{ф}}$ тягової підстанції

$$\varphi_x = \frac{I_{\text{ф}}}{I_{\text{е}}}. \quad (2)$$

Іншими словами, помноживши значення функції струморозподілу в координаті місцезнаходження електровозу на струм, що споживає електровоз, отримуємо струм фідера тягової підстанції. При знаходженні декількох електровозів на фідерній зоні можна застосувати метод суперпозиції, оскільки отримані результати будуть використані лише в якості першого наближення шуканої величини.

Тягові підстанції змінного струму до контактної мережі підключаються через нейтральні вставки, оскільки електровоз перед заїздом на нейтральну вставку вимикає силові кола і на самій вставці струму не споживає, то для спрощення подальших математичних викладок вважатимемо функції струморозподілу в точках приєднання нейтральних вставок неперервними.

З урахуванням прийнятого припущення очевидним є те, що функція струморозподілу i -го фідера тягової підстанції неперервна, кусочно-лінійна, визначена на фідерній зоні кожного фідера тягової підстанції та змінює значення тільки при зміні схеми живлення тягової мережі ділянки.

Отримання значень функцій струморозподілу для класичних схем живлення (консольна, двостороння, вузлова, повного паралельного з'єднання, петлева) значних труднощів не викликає. Схеми ділянок з указаними схемами

живлення та відповідними їм значеннями функцій струморозподілу наведені на рис. 1.

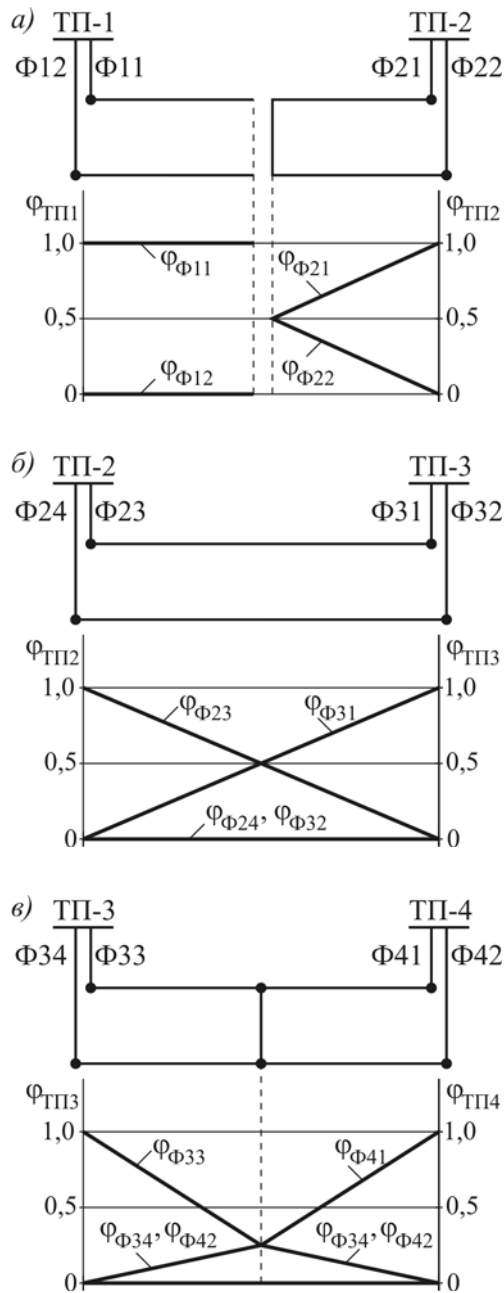


Рис. 1. Значення функцій струморозподілу: а) консольна та петлева схеми; б) двостороння з розділним живленням колій; в) вузлова

На рис. 1 індекси функцій струморозподілу вказані для руху електровозу в непарному напрямку. При русі електровозу в парному напрямку треба змінити індекси функцій струморозподілу на протилежні, тобто Φ_{11} на Φ_{12} , Φ_{13} на Φ_{14} , Φ_{24} на Φ_{23} і т.д.

На практиці можуть мати місце більш складні схеми живлення, зумовлені місцевими особливостями електрифікованих залізниць.

Для визначення функцій струморозподілу таких складних схем та можливого набору кла-

сичних пропонується застосування матричного методу. Розрахунки матриць виконуються один раз для визначення функцій струморозподілу фідерів тягових підстанцій. Далі за відомими значеннями відбувається подальше моделювання. Такий підхід дозволяє в цілому збільшити швидкість роботи моделі без втрат у точності розрахунків, оскільки обернення комбінованої матриці у виразі (1) виконується лише після безпосереднього складання схеми живлення в моделі та при можливих перемиканнях схеми в процесі моделювання.

Отримаємо вираз для розрахунку значень функцій струморозподілу в матричній формі. Заданою наступною схемою живлення та побудуємо її граф (рис. 2).

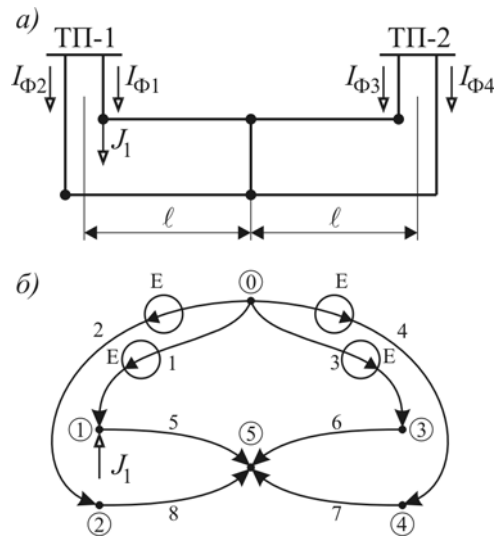


Рис. 2. Вузлова схема живлення тягової мережі (а) та її граф (б)

Згідно з визначенням (2), при знаходженні електровозу в 1-му вузлі для фідера Φ_1 тягової підстанції ТП-1 матимемо

$$\Phi_{11} = \frac{I_{\Phi_1}}{J_1}. \quad (3)$$

В свою чергу згідно з (1), струм фідера I_{Φ_1} визначиться, як

$$I_{\Phi_1} = \left(\begin{bmatrix} M \\ N \cdot Z \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} J \\ N \cdot E \end{bmatrix} \right)_1. \quad (4)$$

При визначенні значень функцій струморозподілу будемо вважати величини напруги на шинах суміжних підстанцій рівними. Оскільки застосовується метод суперпозиції (тільки один електровоз), то другий множник виразу (4) запишеться у вигляді:

$$\begin{vmatrix} J \\ N \cdot E \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ J_5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} J_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Для першого множника у виразі (4) в [9] прийнято позначення B . Для схеми (рис. 2) матимемо

$$\begin{vmatrix} M \\ N \cdot Z \end{vmatrix}^{-1} = B = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{18} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{28} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{81} & b_{82} & \dots & b_{88} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Підставляючи вирази (5), (6) у вираз (4), отримаємо $I_{\Phi 1} = b_{11} \cdot J_1$. Підставляючи значення $I_{\Phi 1}$ у вираз (3), отримаємо

$$\Phi_{11} = \frac{b_{11} \cdot J_1}{J_1} = b_{11}.$$

Розглядаючи знаходження електровозу послідовно в усіх вузлах графа схеми, для кожного фідеру тягової підстанції отримаємо матрицю значень функцій струмозподілу

$$\Phi = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Отже, шукана матриця значень функцій струмозподілу є підматрицею значень, що визначається виразом (1). Перепишемо вираз (6), використовуючи поняття «блокових матриць» [9]

$$\begin{aligned} B = \begin{vmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} M_{\alpha} & M_{\beta} \\ N_{\alpha} & N_{\beta} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} Z_{\alpha\alpha} & Z_{\alpha\beta} \\ Z_{\beta\alpha} & Z_{\beta\beta} \end{vmatrix}^{-1} = \\ &= \begin{vmatrix} M_{\alpha} & M_{\beta} \\ N_{\alpha}Z_{\alpha\alpha} + N_{\beta}Z_{\beta\alpha} & N_{\alpha}Z_{\alpha\beta} + N_{\beta}Z_{\beta\beta} \end{vmatrix}^{-1} = \end{aligned}$$

$$= \begin{vmatrix} M_{\alpha} & M_{\beta} \\ N_{\alpha}Z_{\alpha\alpha} & N_{\beta}Z_{\beta\beta} \end{vmatrix}^{-1}.$$

При перетвореннях прийнято $Z_{\alpha\beta} = 0$ та $Z_{\beta\alpha} = 0$, оскільки явище взаємодукції між контактними підвісками суміжних колій, що кількісно враховується цими матрицями, не впливає на розподіл струмів у тяговій мережі.

Як відомо, добуток прямої та оберненої матриць дорівнює одиничній матриці, тому

$$\begin{vmatrix} M_{\alpha} & M_{\beta} \\ N_{\alpha}Z_{\alpha\alpha} & N_{\beta}Z_{\beta\beta} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

З рівності (8) впливає система 4 рівнянь, розв'язуючи які відносно B_{11} , отримаємо вираз для безпосереднього визначення матриці значень функцій струмозподілу

$$\Phi = B_{11} = \left[M_{\alpha} - M_{\beta} (N_{\beta}Z_{\beta\beta})^{-1} N_{\alpha}Z_{\alpha\alpha} \right]^{-1}. \quad (9)$$

Аналізуючи отриманий вираз, видно що операція знаходження оберненої матриці застосовується двічі. Крім збільшення часу розрахунку виразу (9) у порівнянні з розрахунком виразу (1), не завжди для конкретного графа в чисельному виді можна знайти обернену матрицю $\left[M_{\alpha} - M_{\beta} (N_{\beta}Z_{\beta\beta})^{-1} N_{\alpha}Z_{\alpha\alpha} \right]$ через її сингулярність. Тому в програмній реалізації моделі визначається перший множник виразу (1), а потім з отриманої матриці чисел вилучаються ті строки та стовбці, що відповідають хордам вихідного графа миттєвої схеми.

Слід також зауважити, що знайдена таким чином матриця чисел повністю відповідає значенням функцій струмозподілу при знаходженні електровозу в кожному з вузлів графа (рис. 2). Для розрахунку струмозподілу в схемі живлення, коли електровоз знаходиться між вузлами графа, значення функції струмозподілу можна знайти за допомогою лінійної інтерполяції, використовуючи знайдені значення функції у вузлах, між якими знаходиться електровоз. Оскільки функція струмозподілу лінійна між вузлами графа, то лінійна інтерполяція не внесе похибки в результат розрахунку.

Сучасні об'єктно-орієнтовані середовища програмування дозволяють використовувати технології програмування паралельних потоків. Застосування паралельних потоків надає інструмент декомпозиції для розв'язання складних задач, в нашому випадку задачі розрахунку

системи тягового електропостачання, моделювання якої описується групою паралельних процесів, що взаємодіють між собою.

В розробленій моделі елементи системи тягового електропостачання описані спеціальними об'єктами.

Так, система тягового електропостачання складається з наступних об'єктів:

- тягова підстанція;
- вузол з'єднання контактних підвісок суміжних колій;
- тягова мережа.

Віртуальний об'єкт «тягова підстанція» описується наступними властивостями та методами:

- параметри силових трансформаторів;
- схеми підключення до зовнішньої енергосистеми та тягової мережі;
- статистична модель районного навантаження;
- координати розміщення підстанції та підключення живлячих фідерів до контактної мережі;
- значення функцій струмозподілу для кожного фідера при знаходженні електровозу у вузлах в межах підстанційної зони;
- значення струмів фідерів, струмів плечей живлення, струмів у фазах трансформатора;
- функція визначення значень функцій струмозподілу;
- деякі спеціальні властивості та методи для візуалізації об'єкту.

Об'єкт, що відповідає за вузол з'єднання контактних підвісок суміжних колій має лише дві властивості – координату розміщення та індикатор «розірваного» вузла, що дає змогу розрахувати петлеві схеми живлення, які застосовують на практиці при наявності значних вирівнювальних струмів.

Об'єкт «тягова мережа» містить дані про типи проводів контактної мережі, тип рейкової мережі ділянки, геометричне розташування проводів у просторі та ін. Передбачена можливість врахування неоднорідності контактної чи рейкової мережі, яка враховується різними типами проводів та підключенням пристроїв системи автоблокування у рейкові кола.

Параметри системи тягового електропостачання суттєво впливають на роботу електрорухомого складу. Кількісно цей вплив може бути оцінено напругою на струмоприймачеві електровозу, від величини якої в свою чергу залежить режим ведення поїзду, час його руху, витрати електроенергії та інші показники. Суттєво також впливає спектральний склад напруги,

яким неможливо знехтувати при розрахунках якості електричної енергії.

Для вирішення цієї задачі основні характеристики електрорухомого складу можна визначити на основі кривої намагнічування тягового двигуна [10]. Для врахування спектрального складу напруги необхідно моделювати роботу схеми перетворювача електровозу. Це також дозволить визначати і зворотній вплив електрорухомого складу на систему тягового електропостачання.

В розглянутій моделі поїзд описується віртуальним об'єктом з певними параметрами. Одним з методів об'єкту є процедура-процес, що відповідає за рух поїзда та розрахунок характеристик електрорухомого складу під час руху. Поява кожного поїзда на розрахунковій ділянці в моделі ініціює наслідування описаного віртуального об'єкту та запуск окремого паралельного потоку таким чином, що кількість поїздів на розрахунковій зоні відповідає кількості паралельних потоків у моделі. Синхронізація потоків між собою виконується через глобальну змінну, що має розмірність часу.

Загалом можна окреслити наступний порядок виконання імітаційного моделювання:

1. Введення вихідних даних.
2. Розрахунок функцій струмозподілу для введеної схеми живлення.
3. Визначення режиму напруги в системі зовнішнього електропостачання для кожної тягової підстанції.
4. Визначення напруги на шинах 27,5 кВ кожної тягової підстанції, враховуючи параметри тягових трансформаторів та схеми їх підключення до живлячої та тягової мережі.
5. Ініціювання запуску паралельного потоку, що відповідає появі поїзду відповідно до графіку руху поїздів.
6. Рекурсивне визначення режиму напруги в тяговій мережі з урахуванням обраного методу розрахунку.
7. При нерівності змінної змодельованого часу змінній дослідного періоду перехід до п. 3.
8. Статистична обробка отриманих результатів.
9. Зміна необхідних параметрів у вихідних даних при оптимізаційних розрахунках та перехід до п. 2.
10. Завершення моделювання та виведення результатів розрахунку.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий [Текст] / под ред. И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007.
2. Волынцев, В. В. Моделирование внешних характеристик тяговых подстанций переменного тока при квазиустановившемся режиме [Текст] / В. В. Волынцев // Исследование надежности и эффективности работы устройств электроснабжения электрических железных дорог: межвуз. сб. науч. тр. – Хабаровск, 2000.
3. Пашкова, Н. В. Расчет нестационарных волновых процессов на примере участка тяговой сети [Текст] / Н. В. Пашкова // Материалы региональной науч.-практ. конф. – Новосибирск: Сибирский гос. ун-т путей сообщения, 2003.
4. Коробков, Г. В. Моделирование участка тяговой сети для оценки влияния КУ на гармонический состав токов [Текст] / Г. В. Коробков // Вуз. тематич. сб. науч. тр. аспирантов (Омский гос. ун-т путей сообщения). – Омск: ОмГУПС, 2002.
5. Зажирко, В. Н. Способ расчета нестационарных волновых процессов в однородных линиях [Текст] // Материалы пятой межд. конф. – М.: Московский энергетический институт, 2003.
6. Косарев, А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока [Текст] / А. Б. Косарев. – М.: Интекст, 2004.
7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения [Текст]. – К.: Госстандарт Украины, 1999.
8. Кузнецов, В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог [Текст] / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мышко, Д. А. Босый // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 12. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2006.
9. Мельников, Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей [Текст] / Н. А. Мельников. – М.-Л.: Энергия, 1966.
10. Марквардт, Г. Г. Расчетная модель электрической железной дороги [Текст] / Г. Г. Марквардт, Б. А. Бесков // Тр. МИИТа. – 1956. – № 90/13.

Надійшла до редколегії 26.08.2008.