

В.В. Винокуров

ОЦІНКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ ТРАНСПОРТУ З ІНДУКТИВНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ

V.V. Vinokurov

ASSESSMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF OPERATING MODES OF A POWER NETWORK OF TRANSPORT WITH INDUCTIVE TRANSMISSION OF ENERGY

Розглянуто і проаналізовано відомі математичні моделі тягових мереж у системі транспорту з індуктивною передачею енергії. Підкреслено головні особливості тягової мережі індукційного транспорту. Обґрунтовано необхідність вдосконалення математичної моделі тягової мережі в режимі навантаження. Запропоновано сучасну систему комп'ютерної математики Matlab для застосування у вирішенні задач імітаційного моделювання в системі транспорту з індуктивною передачею енергії.

Ключові слова: *безконтактний транспорт, тягова мережа, математичне моделювання, розподілені параметри, диференціальне рівняння*

Постановка проблеми. Провідне місце у забезпеченні стабільного стану економіки України займає енергетика. Найважливішою складовою паливно-енергетичного комплексу є вугледобувна промисловість. Це зумовлено такими важливими чинниками, як відносна доступність вугілля та відсутність змінюваності цін на нього. За прогнозами провідних вчених України, вугілля послідовно замінить нафту і газ на основі еквівалентної енергії [1]. Проте вугледобувна промисловість в даний час переживає значні труднощі, серед яких перехід гірничих робіт шахт Донбасу на більш глибокі горизонти зі збільшенням довжин транспортування гірської маси та підвищення кількості аварій, пов'язаних з вибухами метану. Це вимагає вдосконалення вже існуючих і розробки нових видів шахтного транспорту, одним з яких є безконтактні електровози В14. Принцип дії таких локомотивів базується на передачі енергії за допомогою електромагнітної індукції, що обумовлює відсутність іскроутворення в шахтах небезпечних за показниками газу і пилу. При порівнянні акумуляторних електровозів (що переважають у локомотивному парку вугільних шахт) з безконтактними аналогічної зчпної ваги, останні перевершують за питомою потужністю, питомою енергією, надійністю, довговічністю, безпекою обслуговування та іскробезпекою.

Аналіз результатів останніх досліджень. Аналіз режимів роботи комплексу транспорту з індуктивною передачею енергії вимагає обліку особливостей його

системи електропостачання. Остання характеризується наявністю джерела струму підвищеної частоти – тягового перетворювача частоти (ТПЧ) і тягової мережі, яка є неоднорідною лінією з розподіленими параметрами. Велика кількість компенсуючих конденсаторів ускладнює моделювання як навантаженої мережі, так і самого навантаження. На роботу навантаженої мережі впливає не тільки поздовжня компенсація, але й опори, що вносяться електровозами. Як конденсатори, так і вносимі опори навантаження, є зосередженими неоднорідностями, включеними послідовно в тягову мережу. Останнє обумовлює не тільки складність моделювання режимів тягової мережі, а й різноманіття вирішуваних при цьому завдань.

Так було розроблено математичну модель тягової мережі для усталеного режиму [2, 3], де було застосовано підхід, що полягає в наступному: падіння напруги на конденсаторах поздовжньої компенсації приймається еквівалентним наявності джерел ЕРС, підключених в місцях знаходження компенсаційних пунктів, щільність напруги яких пропорційна узагальненій дельта-функції. Якщо позначити щільність ЕРС через $\varepsilon(x)$, то, враховуючи, що в точці $x = x_k$ включення зосередженого джерела або навантаження вона (ЕРС) пропорційна узагальненій дельта-функції, виходить:

$$\chi(x) | u_k \delta(x - x_k).$$

Оскільки конденсатори включені по всій довжині тягової мережі, справедливо:

$$\kappa(x) = \sum_{k=1}^m u_k \delta(x - x_k),$$

де u_k – миттєве значення падіння напруги на конденсаторі поздовжньої компенсації; κ – номер компенсуючого конденсатора; m – кількість компенсуючих конденсаторів до даного перерізу; $\delta(x-x_k)$ – дельта-функція:

$$\delta(x - x_k) = \begin{cases} 0 & x \neq x_k \\ 1 & x = x_k \end{cases}$$

Математична модель ненавантаженої (без руху електровозів) мережі в ustalеному режимі, з урахуванням вищенаведеного, була подана диференціальними рівняннями для комплексних значень напруги і струму:

$$\begin{cases} 4dU/dx = (R_0 + j\omega L_0) \sum_{k=1}^m u_k \delta(x - x_k); \\ 4dI/dx = (G_0 + j\omega C_0) U. \end{cases}$$

Недоліком цієї моделі є можливість її використання тільки для ustalеного режиму, тобто без урахування складової часу.

Представлення падіння напруги на конденсаторах поздовжньої компенсації у вигляді джерела ЕРС використано і при математичному моделюванні перехідних режимів тягової мережі [4, 5].

На цій підставі була запропонована [6] модифікована система „телеграфних“ рівнянь, яка відображає залежності між параметрами режиму тягової мережі в перехідних процесах:

$$\begin{cases} 4\epsilon u / \epsilon x = L_0 \epsilon i / \epsilon t + 2 R_0 i \\ \sum_{k=1}^m u_k \delta(x - x_k); \\ 4\epsilon i / \epsilon x = C_0 \epsilon u / \epsilon t, \end{cases} \quad (1)$$

де u, i – відповідно миттєві значення напруги і струму в перерізі лінії; L_0, R_0, C_0 – первинні параметри лінії.

Складність аналітичного вирішення подібної системи рівнянь зумовила застосування чисельного методу.

Після перетворень системи (1) отримуємо:

$$\begin{cases} \epsilon^2 u / \epsilon x^2 = L_0 \epsilon^2 i / \epsilon t^2 + 2 R_0 \epsilon i / \epsilon t + 4 \sum_{k=1}^m u_k \delta(x - x_k); \\ 2 R_0 \epsilon i / \epsilon t = C_0 \epsilon u / \epsilon t. \end{cases} \quad (2)$$

Рівняння (2) є диференціальним рівнянням другого порядку в частинних похідних і згідно [7] відноситься до гіперболічного типу. Наявність коефіцієнтів,

обумовлених застосуванням узагальнених функцій, ускладнює аналітичне вирішення рівняння. Узагальненими функціями дійсних змінних є функції, що змінюють свої значення тільки в дискретній послідовності точок розриву. Застосування чисельного методу прогонки дозволило отримати вирішення рівнянь гіперболічного типу і допустиме за наявності розривних коефіцієнтів [7]. Використано метод прогонки, що базується на заміні диференціальних операторів різницевиими.

У результаті алгебраїзації і дискретизації системи диференціальних рівнянь у частинних похідних (1) виходить система лінійних рівнянь у скінченно-розривній формі, яка зв'язує значення напруги на трьох тимчасових шарах і може бути вирішена після задання відповідних крайових умов.

Зміна амплітуди I_0 вхідного струму тягової мережі визначається режимами роботи як самої мережі, так і перетворювача частоти. Описана модель може бути застосована для аналізу параметрів перехідних режимів тягової мережі з урахуванням припущень:

– тягову мережу розглянуто як однорідну лінію, у переріз якої включені зосереджені неоднорідності (конденсатори поздовжньої компенсації);

– падіння напруги на конденсаторах поздовжньої компенсації вважається еквівалентним наявності джерел ЕРС, підключених в місцях знаходження компенсаційних пунктів, щільність напруги яких пропорційна узагальненій функції;

– активна провідність ізоляції тягової мережі незначна і тому не враховується;

– активна провідність втрат в конденсаторах поздовжньої компенсації не враховується через її незначний вплив на точність розрахунку при реальних довжинах тягових мереж.

Проте дана модель описує лише ненавантажений режим мережі, зокрема режим пуску ТПЧ [8], без урахування опору, що вноситься електровозом.

У моделі перехідного режиму ненавантаженої тягової мережі [6], система рівнянь для ненавантаженої тягової мережі доповнюється виразом, що враховує опори від електровозів. Тут для опису неоднорідності також застосовано математичний апарат узагальнених функцій. Система рівнянь для навантаженої тягової мережі в перехідних режимах записується у вигляді [8]:

$$\begin{cases} 4\epsilon u / \epsilon x = L_0 \epsilon i / \epsilon t + 2 R_0 i \\ \sum_{k=1}^m u_k \delta(x - x_k) + 2 \sum_{en=1}^{N_e} Z_{en} i_{en} \delta(x - x_{en}); \\ 4\epsilon i / \epsilon x = C_0 \epsilon u / \epsilon t, \end{cases} \quad (3)$$

де i_{en} – миттєве значення струму в перерізі тягової мережі, що відповідає координаті місцезнаходження електровоза; x_{en} – координата відповідного перерізу; Z_{en} – опір, що вноситься електровозом; $\delta(x-x_{en})$ – дельта-функція; N_e – кількість електровозів.

Оскільки час розповсюдження енергії на ділянці знаходження електровоза складає наносекунди і погіршеність розрахунку при цьому виявляється вельми неістотною, тому опори, що вносяться електровозами, вважаються включеними в точці.

Рішення подібних (3) систем рівнянь може проводитися шляхом заміни диференціалів скінченними різницями. Після тотожних перетворень виходять рівняння щодо напруги і струму.

Математична модель навантаженої тягової мережі була реалізована за допомогою алгоритму, в основу якого покладений метод прогонки, що найчастіше використовується при чисельному вирішенні диференціальних рівнянь в частинних похідних, що відносяться до гіперболічного типу. Побудований на підставі математичної моделі навантаженої тягової мережі алгоритм розрахунку параметрів її режиму дозволив досліджувати їхню зміну при переміщеннях електровозовів у підземних виробках, виходячи з припущення, що опори, які вносяться, вважаються включеними в точці.

Дослідження на математичній моделі процесу переміщення електровоза уздовж тягової мережі показало, що в перерізах, відповідних місцезнаходженню електровоза, відбувається стрибкоподібна зміна напруги, а значення напруги в інших перерізах мережі змінюються залежно від того, знаходиться цей переріз до точки включення опору, що вноситься, або після неї, відповідно, на відміну від сталого режиму [9]. Це пояснюється тим, що в перехідному процесі спостерігається заломлення падаючої хвилі на опорі, що вноситься, який є неоднорідністю. Внаслідок цього змінюються параметри режиму в різних перерізах до і після координати місцезнаходження електровоза. У роботі розглянуто варіанти місцезнаходження точки прикладання навантаження на початку маршруту, в середині маршруту і в кінці його. Однак невідомо, які зміни параметрів відбуваються в усьому комплексі.

Задачі досліджень. Гостро зростаюча потреба вугледобувної промисловості у новому високоєфективному транспорті створює передумови для більш широкого впровадження транспорту з індуктивною передачею енергії.

Аналіз відомих праць в галузі цього виду транспорту [2–6, 8–9] показує, що існує ціла низка проблем, які ще не знайшли вирішення. Такою проблемою, зокрема, є вдосконалення енергетичних характеристик роботи безконтактного електровозу. Вирішення цієї проблеми можливе через моделювання режимів роботи комплексу транспорту, що дозволить обґрунтувати ефективні, з точки зору енергоспоживання, параметри його елементів.

Всі попередні роботи спиралися на математичний апарат скінченнорізницевої схем та узагальнених функцій. Сучасні інформаційні технології дозволяють використовувати нові, більш потужні обчислювальні інструменти для моделювання складних систем. Найбільш перспективним з таких інструментів для використання в даній сфері постає пакет MatLAB, математичний апарат якого максимально наближений до математичного апарату інженерів та

вчених. Унікальність цієї обчислювальної системи, порівняно з іншими (MathCAD, Maple), полягає у тому, що розрахунки виконуються над векторами або наборами векторів, а це забезпечує найбільш високу швидкість і точність роботи [10]. Система містить в собі великий набір бібліотечних функцій, які характеризуються відкритістю та можливістю розширення. Це свідчить про те, що робота в середовищі системи може бути реалізована як в режимі калькулятора, так і шляхом звертання до програми, яка написана на мові MatLAB. Останні версії системи дозволяють легко інтегрувати її з зовнішніми програмними середовищами (Microsoft Office Word, Microsoft Office Excel, MathCAD, Maple). Особливий інтерес становить одна з прикладних програм MatLAB – Simulink, що виконує блочне імітаційне і візуально-орієнтоване моделювання динамічних систем та володіє найвищим ступенем візуалізації результатів.

Таким чином, першочерговими завданнями наступних досліджень стають обґрунтування вибору інструменту для реалізації моделей та створення самих моделей, що враховуватимуть як вплив навантаження від електровозовів на тягову мережу у будь-якому її перерізі, так і чисельність рухомого складу.

Висновки. Актуальність ідеї відновлення на вугільних шахтах використання безконтактного транспорту підтверджується сучасним станом галузі. Отже вирішення потребують задачі підвищення енергоефективності цього виду транспорту через системне дослідження енергетичних параметрів комплексу шляхом моделювання його режимів роботи.

Розроблені моделі тягової мережі дозволяють описати тільки один з режимів: усталений, перехідний для пуску, перехідний режим ненавантаженої мережі.

Математична модель, що описує навантажений режим, свідчить, що значення опору, що вноситься, залежить від параметрів регулювання приймального контуру електровоза, а значення напруги в перерізах мережі, відповідних місцезнаходженню електровоза, зростають при збільшенні опору навантаження. У точці ввімкнення опору, що вноситься, відбувається стрибкоподібне зростання значення напруги. Однак така модель не дозволяє адекватно описати характер процесів у будь-якому перерізі тягової мережі, тому робота по створенню моделі, яка враховує складову часу і опір, що вноситься електровозом, і адекватно описує характер процесів у кожному перерізі за умови використання сучасних математичних програмних засобів, є необхідною. Завданням наступних досліджень є моделювання навантаженого режиму тягової мережі з урахуванням тих чинників, що не були розглянуті в минулому.

Список літератури

1. Шидловський А.К., Півняк Г.Г., О.В. Кириленко Проблеми розвитку сучасної енергетики. – Маріуполь, 2008. – С. 16–17.
2. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / Г.Г. Пивняк, И.П. Ремизов, С.А. Сараткиянц и др.; под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра. – 1990. – 245 с.

3. Зражевский Ю.М. Обоснование параметров установившегося режима тяговой сети рудничного бесконтактного электрического транспорта.– Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Д., 1989. – 19 с.
4. Зражевский Ю.М., Рыбалко А.Я., Хованская Е.И. Пусковой режим тяговой сети бесконтактного электрического транспорта // Горная электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Киев, 1989. – Вып. 54. – С. 53–56.
5. Зражевский Ю.М., Рыбалко А.Я., Хованская Е.И. Повышение точности расчета пускового режима системы электроснабжения бесконтактного электрического транспорта // Кибернетика электрических систем. Электроснабжение промышленных предприятий: тез. докл. XII сессии Всес. научн. семинара. 19–22 ноября 1991г. – Гомель, 1991. – С. 109–110.
6. Хованская Е.И. Обоснование параметров переходных режимов тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Д., 1997. – С. 9–10.
7. Самарский А.А. Теория разностных схем.– М.: Наука, 1983. – 616 с.
8. Пивняк Г.Г., Зражевский Ю.М., Хованская Е.И., Задачи моделирования режимов работы тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии. – Технічна термодинаміка. Тематичний вип. „Проблеми сучасної електротехніки“. – Ч.7. – 2004. – С. 112–116.
9. Зражевский Ю.М., Хованская Е.И., Бобров А.В. Особенности моделирования режимов работы тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии // Электротехника и электроэнергетика. – 2001. – №92. – С. 66–68.

10. Лазарев Ю.Ф. Начала программирования в среде MatLAB: Учебное пособие.– К.: НТУУ „КПИ“, 2003. – 424 с.

Рассмотрены и проанализированы известные математические модели тяговых сетей в системе транспорта с индуктивной передачей энергии. Подчеркнуты главные особенности тяговой сети индукционного транспорта. Обоснована необходимость усовершенствования математической модели тяговой сети в режиме нагрузки. Предложена современная система компьютерной математики Matlab для применения в решении задач имитационного моделирования в системе транспорта с индуктивной передачей энергии.

Ключевые слова: *бесконтактный транспорт, тяговая сеть, математическое моделирование, распределенные параметры, дифференциальное уравнение*

Existing mathematical models of traction line in the transport system with an inductive energy transfer have been considered and analyzed. The main features of traction line of induction transport have been underlined. Necessity of mathematical model of traction line improvement for loading mode has been substantiated. Modern system of computer mathematics Matlab applying for solving problems of simulation in the transport system with inductive energy transfer has been proposed.

Keywords: *contactless transport, power network, mathematical modeling, distributed parameters, differential equation*

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.Т. Заїкою 18.05.10

УДК 621.314

© Заїка В.Т., Котенко С.С., Луценко І.М., 2010

В.Т. Заїка, С.С. Котенко, І.М. Луценко

НАВАНТАЖУВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ ТРАНСФОРМАТОРІВ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ СЕЛИЩ МІСЬКОГО ТИПУ

V.T. Zaika, S.S. Kotenko, I.M. Lutsenko

LOADING ABILITY OF POWER TRANSFORMERS OF DISTRIBUTING ELECTRIC NETWORKS IN URBAN VILLAGES

Проаналізовано завантаження трансформаторних підстанцій споживачів селищ міського типу за типовими графіками електричних навантажень. Проведено розрахунки температурних режимів роботи трансформаторів та зносу ізоляції їх обмоток за реальними графіками електричних навантажень з використанням стандартної методики розрахунку. Виявлено неефективне використання навантажувальної здатності трансформаторів. Запропоновано та обґрунтовано рекомендації по раціональному використанню строку служби трансформаторів розподільних підстанцій шляхом впровадження систем енергомоніторингу.

Ключові слова: *трансформатор, навантажувальна здатність, температура, знос ізоляції, строк служби*

До складу електричних мереж с.м.т. Солоного та Солонянського району входять трансформаторні підстанції, повітряні та кабельні лінії електропередач.

Найбільш важливою складовою частиною електричних мереж з точки зору забезпечення надійності електропостачання та покращення техніко-економіч-

них показників вважаються трансформаторні підстанції, основними елементами яких є трансформатори.

Навантажувальна здатність – це один з найважливіших показників ефективності роботи будь-якої системи електропостачання. Надійність роботи трансформаторного обладнання безпосередньо пов'язана зі