

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В статті розглядаються аспекти побудови моделі для дослідження електромагнітних процесів у тяговій мережі постійного струму.

Ключові слова: тягова мережа, електромагнітні процеси, модель, амплітудно-частотна характеристика

В статье рассматриваются аспекты построения модели для исследования электромагнитных процессов в тяговой сети постоянного тока.

Ключевые слова: тяговая сеть, электромагнитные процессы, модель, амплитудно-частотная характеристика

In this article the aspects of model construction for exploring the electromagnetic processes in the electric-traction DC network are considered.

Keywords: electric-traction network, electromagnetic processes, model, amplitude-frequency characteristic

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Відомо, що система тягового електропостачання складається з декількох складових. Якщо тягові підстанції є статичними елементами, то тягова мережа має довжину у десятки кілометрів. Ця обставина спонукає до розгляду електромагнітних процесів у тяговій мережі з двох позицій: розгляд її як ланцюга із зосередженими параметрами або ланцюга з розподіленими параметрами. В теорії електропостачання електрифікованих залізниць [1] приймається, що тягова мережа є лінією із зосередженими параметрами як на постійному ($\omega = 0$), так і на змінному ($\omega = 2\pi f$, $f = 50$ Гц) струмі, а розрахунок енергообмінних процесів здійснюється за схемами заміщення, параметри яких визначаються множенням погонних параметрів (Ом/км, Гн/км) на відповідну довжину. В той же час у реальних умовах перетворення та споживання електричної енергії у системі тягового електропостачання в тяговій мережі (ТМ) відбувається циркуляція вищих гармонійних складових, які необхідно враховувати при моделюванні та розрахунку системи тягового електропостачання [2]. Поява ж електрорухомого складу з асинхронними двигунами ще більше ускладнює характер енергообмінних процесів у ТМ, оскільки частота роботи автономних інверторів має значення кГц, і частотний діапазон при цьому значно розширюється.

Відомо, що будь-яку лінію необхідно розглядати як довгу (тобто з розподіленими параметрами), коли її довжина співпадає або більша

довжини хвилі струму або напруги [3, 4]. Довжина хвилі визначається за формулою:

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}, \quad (1)$$

де v – фазова швидкість, $v = 2,5 \cdot 10^8$ м/с [5];

T – період гармоніки струму або напруги.

Для прикладу розглянемо канонічні гармоніки в прийнятому для СТЕ діапазоні 2 кГц: для шестипульсового випрямляча: \min – 300 Гц, \max – 2400 Гц; для дванадцятипульсового випрямляча: \min – 600 Гц, \max – 2400 Гц. Довжини хвиль відповідно будуть складати: 833 км, 417 км, 104 км. Якщо ж прийняти до уваги, що робоча частота інвертора напруги електровоза з асинхронними двигунами сягає значення 1,0 кГц, а значить, частота спектру генерованих гармонік у тягову мережу буде ще більшою, та той факт, що для розрахунку енергообмінних процесів у ТМ необхідно враховувати 7 міжпідстанційних зон [6] (при середній відстані між тяговими підстанціями 16 км – $L = 7 \times 16 = 112$ км), то стає очевидним той факт, що електромагнітні процеси у ТМ необхідно розглядати як для лінії з розподіленими параметрами.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для розрахунку довгих ліній найбільш часто застосовують схему заміщення, наведену на рис. 1.

Така схема описується системою диференціальних рівнянь, кількість яких визначається в залежності від довжини елементарної ділянки

та довжини розрахункової зони. Наприклад, для вузлової схеми живлення ТМ при відстані між тяговими підстанціями 20 км довжина фідерної зони буде 10 км, а довжина розрахункової ділянки згідно [7] – 0,4 км. Звідси кількість диференціальних рівнянь для розрахунку електромагнітних процесів у контактній підвісці однієї колії складе $10 : 0,4 = 25$. Принагідно зазначимо, що в [8] довжина розрахункової ділянки прийнята – 0,2 км. Чим меншою буде довжина dx , тим більшим буде число розрахункових елементів і, відповідно, число диференціальних рівнянь.

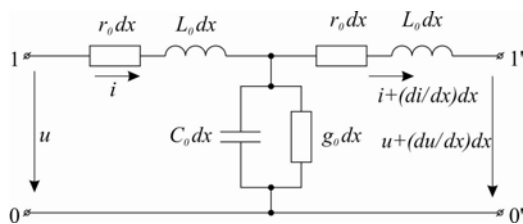


Рис. 1. Схема заміщення ділянки лінії довжиною dx

Тягова мережа включає в себе дві складові: контактну (КМ) та рейкову (РМ) мережі, кожна з яких має свої особливості побудови схеми заміщення. Особливістю розрахунку електромагнітних процесів у КМ є те, що основні реактивні елементи (L і C) зосереджені на тяговій підстанції. При цьому, оскільки двигуни електровозу приєднуються безпосередньо до КМ (на відміну від електровозів змінного струму) [9], то це підсилює взаємозв'язок режимів роботи електровоза та КМ, що в умовах фактично безперервних перехідних процесів (зміна режиму роботи електровоза, зміна елементів профілю, відриви струмоприймача, проходження стиків рейок, зміна режимів роботи системи зовнішнього електропостачання, аварійні процеси і т.ін.) може привести до виникнення локальних (місцевих) комутаційних перенапруг або коливальних процесів у взаємодіючій парі «електровоз – ТМ». Для розрахунку електромагнітних процесів та їх моделювання в КМ найбільше поширення має кінцево-елементна модель лінії з розподіленими параметрами [9 – 11], яка складається із послідовно з'єднаних елементів, зображених на рис. 1. При цьому передбачається, що зміна параметрів схеми відбувається лінійно, оскільки через низький периметр проводів КМ явище поверхневого ефекту не проявляється.

РМ, маючи мідний еквівалент двох рейкових ниток $800 \dots 1000 \text{ мм}^2$, має також і набагато

більші геометричні розміри. При проходженні по них змінного в часі струму щільність струму неоднакова в перерізі рейки, що приводить до необхідності враховування явища поверхневого ефекту [9, 12]. В цьому випадку повздовжні елементи на схемі рис. 1 матимуть наступний вигляд (рис. 2):

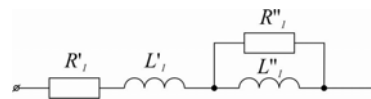


Рис. 2. Схема заміщення повздовжньої складової рейки

Приймаючи вищенаведене до уваги, схема заміщення ділянки лінії РМ довжиною dx матиме наступний вигляд:

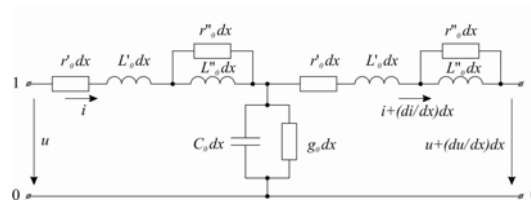


Рис. 3. Схема заміщення ділянки лінії РМ

Необхідно зазначити, що наведена вище схема приведена для однієї рейки. Математичне моделювання РМ повинне проводитись для кола з двох рейкових ниток, які мають загальний провідник (землю), а схема заміщення буде трьохпровідною. На рис. 3 показано, що опір землі дорівнює нулю.

В той же час у науково-технічній літературі, наприклад, у [13], пропонується враховувати опір земляного тракту, взаєміндуктивність між рейками, а також провідність і ємність між ними (рис. 4).

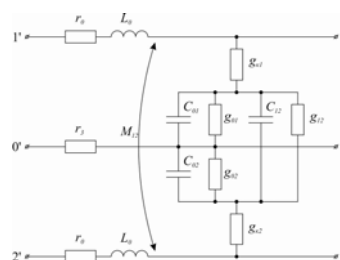


Рис. 4. Схема заміщення елемента РМ з урахуванням опору землі та взаємного впливу рейок:

r_3 – опір землі; M_{12} – взаємна індуктивність між рейками; g_{k1} , g_{k2} – провідності рейка-шпала

Підсумовуючи вищевикладене, для математичного моделювання електромагнітних процесів у тяговій мережі постійного струму повинна застосовуватись наступна схема заміщення:

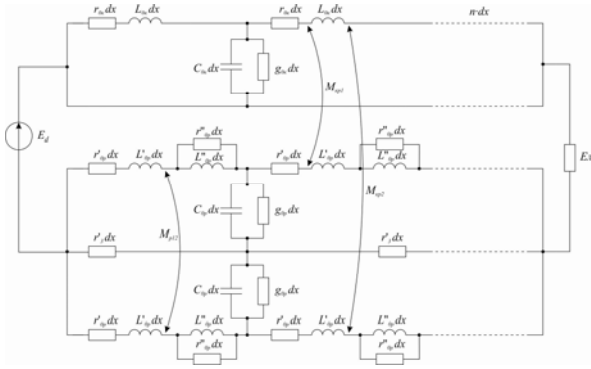


Рис. 5. Схема заміщення елементарної ділянки ТМ (показана одна коїля):
 E – напруга на шинах тягової підстанції.
 E_l – (електровоз) навантаження ТМ

РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ

З урахуванням вищевикладеного Simulink-модель матиме наступний вигляд:

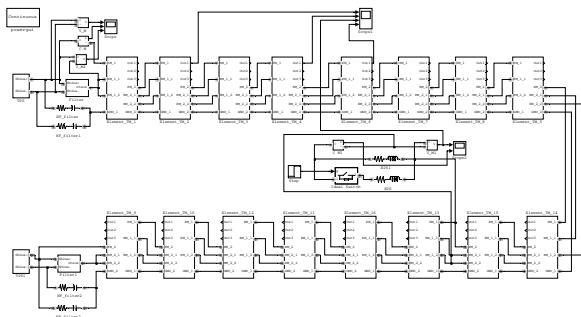


Рис. 6. Модель СТЕ з розподіленими параметрами

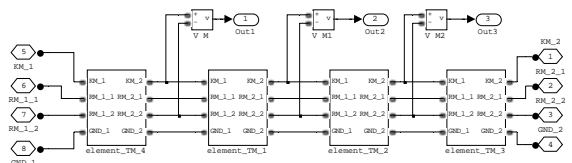


Рис. 7. Підмодель ділянки СТЕ довжиною 1 км з розподіленими параметрами

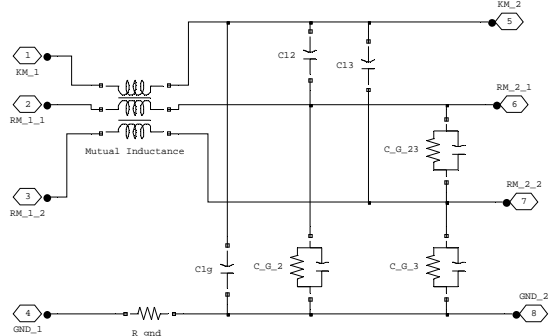


Рис. 8. Модель елементарної ділянки СТЕ з розподіленими параметрами

Для отримання амплітудно-частотної характеристики дослідної ділянки згідно методики

[1] в пакеті MATLAB Simulink розроблено також модель СТЕ з зосередженими параметрами, при цьому використано вихідні дані параметрів ємності та індуктивностей контурів згладжуючого фільтру тягової підстанції, вихідної ємності, питомий опір тягової мережі та опір електровозу в різних режимах (рис. 9, 10).

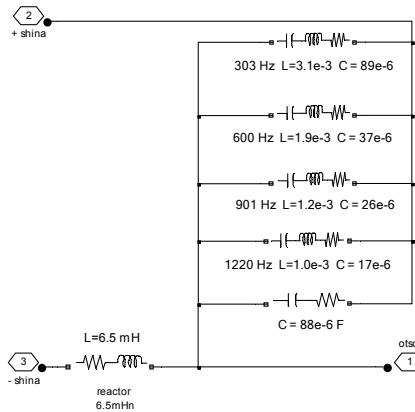


Рис. 9. Модель згладжуючого фільтру тягової підстанції

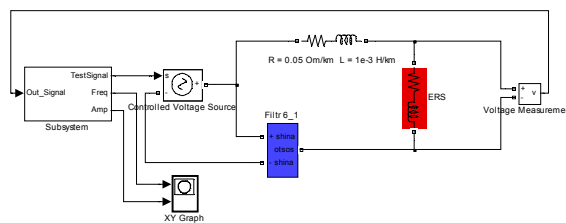


Рис. 10. Модель системи тягового електропостачання для отримання АЧХ з зосередженими параметрами

Результати моделювання представлено на рис. 11 та 12.

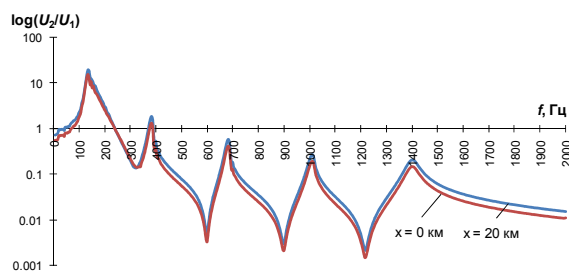


Рис. 11. Амплітудно-частотна характеристика тягової мережі для моделі з зосередженими параметрами

ВИСНОВКИ

Аналіз АЧХ показує, що опір електрорухомого складу (зміна режимів тяга – вибіг) не змінює характеристику, крім того, вона досить мало залежить від розташування електрорухомого складу на ділянці (0...20 км).

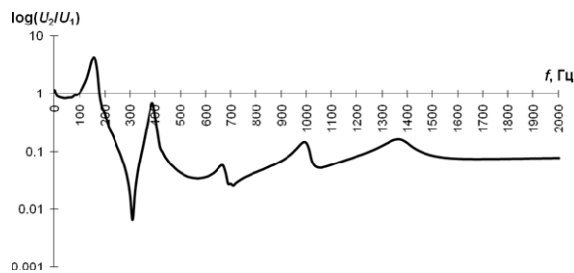


Рис. 12. Амплітудно-частотна характеристика тягової мережі для моделі з розподіленими параметрами

АЧХ пояснює превалююче значення гармонік з частотами 100 та 200 Гц над іншими, оскільки в частотній області 100...200 Гц коефіцієнт передачі більше 1,0 та може досягати десятків. Подібне підсилення можливе і на близькій до 400 Гц частоті.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость [Текст] / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
3. Бессонов, А. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст]. – 11-е изд. / А. А. Бессонов – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.
4. Демирчян, К. С., Теоретические основы электротехники. [Текст] / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. – СПб.: Питер, 2008. – 456 с.
5. Радченко, В. Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги [Текст] / В. Д. Радченко. – М.: Транспорт, 1975. – 360 с.

6. Митрофанов, А. Н. Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов [Текст] / А. Н. Митрофанов. – Самара: Самарская гос. акад. путей сообщения, 2005. – 168 с.
7. Осипов, С. И. Теория электрической тяги [Текст] / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Фектистов. – М.: Маршрут, 2006. – 436 с.
8. Сербиненко, Д. В. Электромагнитные процессы в тяговой сети и их влияние на показатели качества электрической энергии [Текст] / Д. В. Сербиненко, М. С. Хлопков // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 3. – С. 38-42.
9. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом [Текст] / Ю. А. Бахвалов [и др.]. – М.: Транспорт, 2001. – 286 с.
10. Тихменев, Б. Н. Исследование способа демпфирования высокочастотных колебаний в тиристорных преобразователях [Текст] / Б. Н. Тихменев, В. Д. Кондратов, Н. Н. Горин // Сб. тр. ВНИИЖТ. – 1981. – № 642. – С. 94-113.
11. Савоськин, А. Н. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть – электровоз» [Текст] / А. Н. Савоськин, Ю. М. Кулинич, А. С. Алексеев // Электричество. – 2002. – № 2. – С. 29-35.
12. Косарев, Б. И. Электробезопасность в системе электроснабжения железных дорог [Текст] / Б. И. Косарев, Я. А. Зельвянский, Ю. Т. Сибаров. – М.: Транспорт, 1983. – 200 с.
13. Тарасов, Е. М. Принципы распознавания в классификаторах состояний рельсовых линий [Текст] / Е. М. Тарасов. – М.: Маршрут, 2004. – 200 с.

Поступила в редколлегию 22.04.2011.

Принята к печати 28.04.2011.