

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЯГОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ В ЗАДАЧАХ ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ЗМІННОГО СТРУМУ

Д. О. Босий, В. Г. Сиченко

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Кафедра Електропостачання залізниць, ДНУЗТ, вул. Лазаряна 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна
Тел./факс: (0562) 47-16-74, 33-19-11, E-mail: epz@ukr.net, dmitry.bosiy@i.ua

Annotation – Analysis of AC electric locomotives simulation methods are given. Statistical models of AC electric locomotives with controlled rectifiers are proposed.

Key words – simulation, electric locomotive, current disturbance, AC traction, electromagnetic processes.

ВСТУП

В літературі досить добре визначено два підходи до моделювання електротягового навантаження в системах тягового електропостачання змінного струму. Перший базується на модифікованому перетворенні Лапласа. Другий ґрунтується на застосуванні методу миттєвих характеристик до розрахунку несинусоїдних режимів роботи електровозів змінного струму. В якості вихідних даних для розрахунку електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання, як за першим, так і другим методом, необхідне чітке визначення електричних параметрів прийнятої схеми заміщення електровозу.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Одним із перших Мамошин Р. Р. запропонував схему заміщення узагальненої моделі електровозу [1] в операторній формі, яка дозволяє розрахувати спотворення, що вносяться одним електровозом. В цій схемі вентилі перетворювального пристрою замінено ключами, за допомогою перемикання яких реалізується моделювання періодів провідності та комутації реального кола.

В більш нових роботах [2, 3] використовується складніша схема заміщення силових кіл електровозу (рис. 1), в якій вольт-амперні характеристики вентилів апроксимуються виразом

$$u_v = i_v \left(R_{пр} + R_{зв} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctg 10^{10} i_v \right) \right), \quad (1)$$

де $R_{пр}$, $R_{зв}$ – опори діоду при прямому та зворотному вмиканні, Ом.

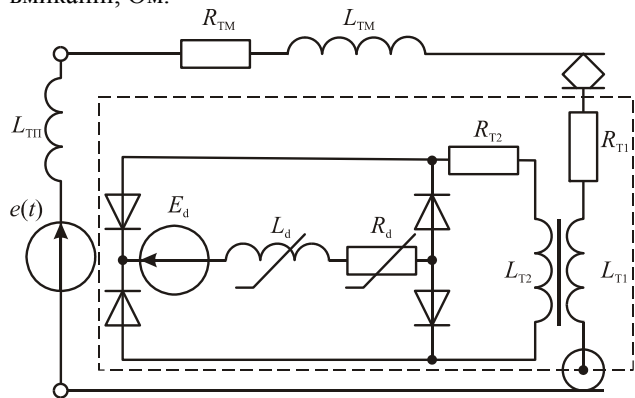


Рис. 1. Схема заміщення силових кіл електровоза

На основі прийнятої схеми заміщення авторами [3] отримано криві миттєвих значень активної та обмінної характеристик електровозу в залежності від значення вхідного струму. Аналогічні, по фізичній суті, характеристики отримано Коробковим Г.В. [4], але в залежності від потужності, що реалізується електровозом ВЛ-80С по результатам експериментальних досліджень.

Авторами даної статті при виконанні досліджень якості електричної енергії на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму та в силових колах магістральних електровозів накопичено значний масив осцилограм струму і напруги як електровозів радянської епохи ВЛ80Т, так і електровозів нового типу – ДС3 (НВО «ДВЗ», Siemens, м. Дніпропетровськ) та 2ЕС5К «Єрмак» (ТОВ «НВЗ» м. Новочеркаськ).

Мета даної роботи – проаналізувати адекватність існуючих методів моделювання електровозів змінного струму, та при необхідності уточнити методологію моделювання в умовах конкретних ділянок залізниць для безпосереднього застосування при моделюванні системи тягового електропостачання [5].

ОСНОВНА ЧАСТИНА

За даними Головного управління локомотивного господарства, розподіл магістральних електровозів змінного струму типів має вигляд, приведений на рис. 2.

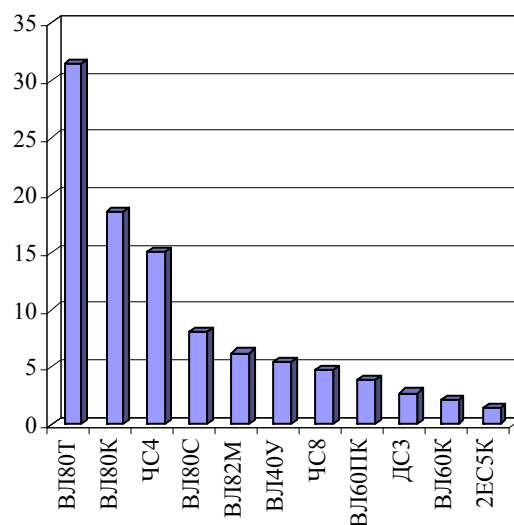


Рис. 2. Розподіл типів електровозів змінного струму в цілому по Укрзалізниці, %

Найбільша кількість електровозів припадає на такі типи: ВЛ80Т – 32 %, ВЛ80К – 19 %, ЧС4 – 15 %; інші типи – менше 10 %.

В межах одного плеча обслуговування локомотивних бригад, розподіл типів електровозів дещо інший, так наприклад, розрахункова ділянка 3 – П обслуговується тільки наступними електровозами: ВЛ80Т – 80 %, ВЛ80С – 12 %, ЧС4 – 5 %, ЧС8 – 3 %, ВЛ60ПК – менше 1 % загальної кількості електровозів на цій ділянці (рис. 3).

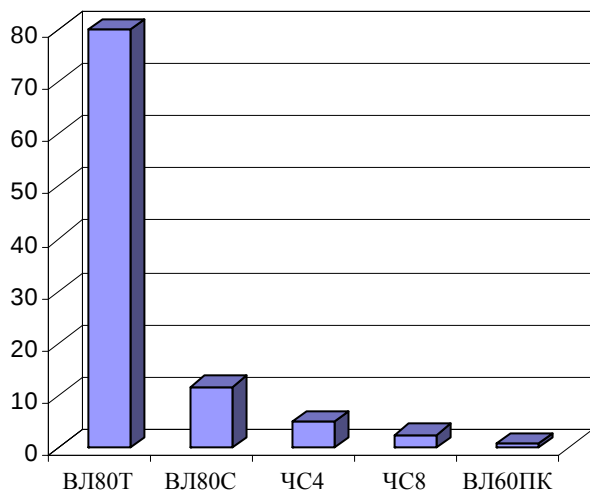


Рис. 3. Розподіл типів електровозів на дослідній ділянці, %

Як видно з приведених гістограм, визначальний вплив на спотворення напруги в контактній мережі дослідної ділянки та на тягових підстанціях, що її живлять, будуть мати електровози змінного струму ВЛ80Т з діодною однофазною мостовою схемою випрямлення. В цілому по мережі електрифікованих залізниць України, лише два типи електровозів будуть створювати дещо інші особливості в режимі напруги, а саме ДС3 та 2ЕС5К. Всі інші типи електровозів використовують діодну некеровану схему випрямлення для живлення тягових двигунів в тяговому режимі. Окрім вказаних винятків складають електровози типу ВЛ80С, в яких застосовується тиристорний перетворювач лише для здійснення режиму електричного гальмування чи рекуперації електричної енергії в первинну мережу. Типи випрямних пристроїв та напівпровідникових приладів електровозів, що обслуговують дослідну ділянку, приведені в табл. 2.

Таблиця 2

№	Тип електровоза	Тип випрямного пристрою для тягового режиму	Тип напівпровідникового приладу
1	ВЛ80Т	ВУК-4000Т-02	ВЛ-200-8
2	ВЛ80С	ВУК-4000Т-02, ВОППД-3,15к-1,4к-02	ВЛ-200-8, ДЛ153-1250-24
3	ЧС4	RV10	VK200/5
4	ЧС8	DIUS EPSILON A	DV 855-250-28
5	ВЛ60П/К	ВУК-60-4Л	ВЛ-200-8

В основному для всіх досліджуваних випрямних пристроїв електровозів характерно застосування діоду

ВЛ-200 щонайменше 8-го класу. Електричними параметрами саме цього приладу слід керуватись при побудові математичної моделі випрямного пристрою електровозу змінного струму. Застосування виразу (1) в якості апроксимації вольт-амперної характеристики даного діоду вносить певну похибку через некоректно апроксимовану характеристику при зворотному вмиканні.

Слід також зауважити, що відмінність форми струму електровозу змінного струму від синусоїди викликана не лише роботою випрямного пристрою, а й характеристикою намагнічення силового тягового трансформатора електровоза. Магнітопровід такого трансформатора виконано з холоднокатаної електротехнічної сталі марки Е330, з товщиною листа 0,35 мм, для частоти 50 Гц. Використовуючи характеристику намагнічення вказаної марки сталі (рис. 4), отримаємо характеристику намагнічення тягового трансформатора. Для цього врахуємо розміри та конструктивні особливості тягового трансформатора електровозу.

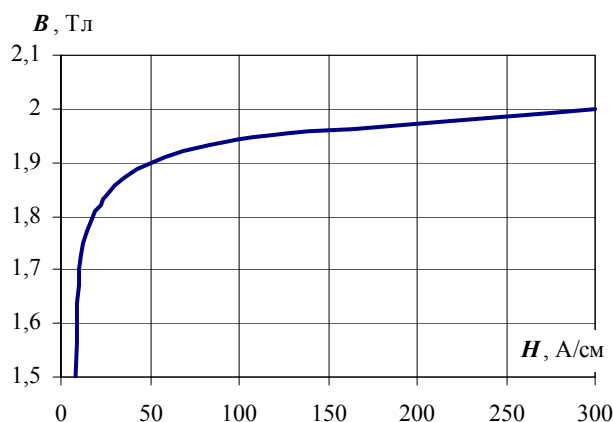


Рис. 4. Характеристика намагнічення сталі тягового трансформатора електровозу змінного струму

Сучасні програмні засоби моделювання електричних схем дозволяють по відомим характеристикам нелінійних елементів (ВАХ діода, крива намагнічення сталі трансформатора) дозволяють одразу отримати результат у вигляді осцилограм. На рис. 5. показано осцилограму струму електровозу змінного струму, отриману в пакеті Multisim у порівнянні з осцилограмою, що була виміряна в силовому колі електровозу під час руху дослідною ділянкою.

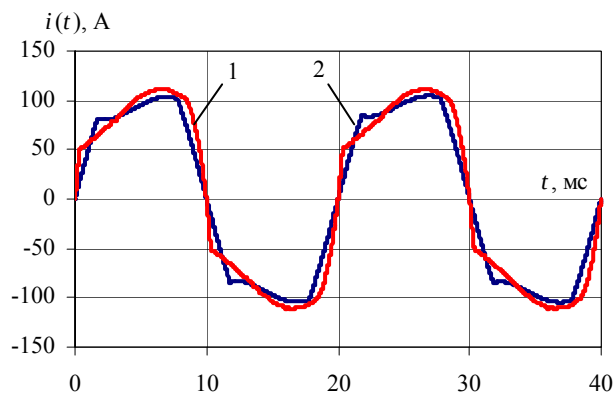


Рис. 5. Осцилограми первинних струмів електровозу ВЛ80Т: 1 – моделювання; 2 – експеримент

При побудові власної імітаційної моделі системи тягового електропостачання доцільно застосувати методологію чисельного розрахунку системи диференціальних рівнянь, записаних в матричній формі, що використана в [2, 3], проте з більш точним врахуванням ВАХ діоду та характеристики намагнічення тягового трансформатору. За одних і тих же параметрів чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь, результати розрахунків в пакеті Multisim та у власній імітаційній моделі співпадають.

Через інший принцип дії перетворювального пристрою осцилограми первинних струмів електровозів ДСЗ та 2ЕС5К принципово відрізняються від осцилограм «випрямних» електровозів.

Перетворення однофазного змінного струму в трифазний для живлення асинхронного приводу електровозу ДСЗ здійснюється за допомогою IGBT модулів, на електровозах типу 2ЕС5К (2ЕЛ5К) застосовано тиристорний перетворювач для живлення двигунів постійного струму з широтно-імпульсною модуляцією.

Осцилограми первинних струмів електровозів ДСЗ та 2ЕС5К приведені на рис. 6.

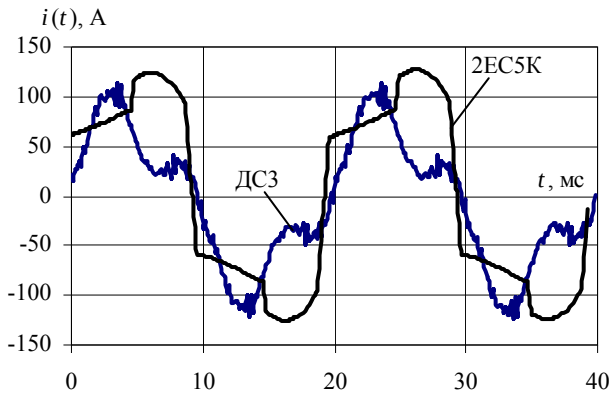


Рис. 6. Осцилограми первинних струмів електровозів ДСЗ та 2ЕС5К

Оскільки математичне моделювання електровозів з перетворювачами керованого типу досить складне [8], тому нами пропонується застосування статистичних моделей, отриманих по результатам дослідних поїздок. Математична модель електровозу, як нелінійного навантаження в цілому, повинна описувати залежність форми напруги на струмоприймачеві електровозу від форми споживаного ним струму. Таким чином такі статистичні моделі необхідно ідентифікувати у фазовій площині $u(t) = f(i(t))$.

На рис. 7, 8 приведені залежності миттєвих значень напруги на струмоприймачеві електровозу від миттєвих значень струмів для електровозів з керованими випрямлячами для діапазону діючих значень первинного струму 10, 20, 50 та 100 А.

На підставі узагальнення накопиченого статистичного матеріалу нами пропонується математична модель в загальному вигляді $z(t) = f(u(t), i(t))$, або в матричній формі $Z_t = f(U_t, I_t)$.

Основа цієї моделі складають матриці миттєвих значень струмів і напруги I_t та U_t , які складаються з відповідним чином обраних осцилограм за формулами (2), (3).

Вертикальна розмірність матриць визначається частотою дискретизації сигналів струму та напруги, горизонтальна розмірність – величиною вибірки n , яка дорівнює кількості точок необхідних для апроксимації діючого значення струму електровоза при русі дослідною ділянкою.

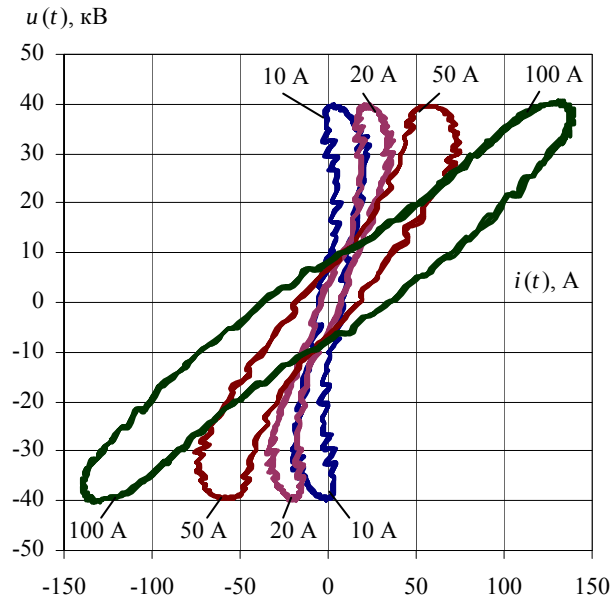


Рис. 7. Статистична модель електровозу ДСЗ

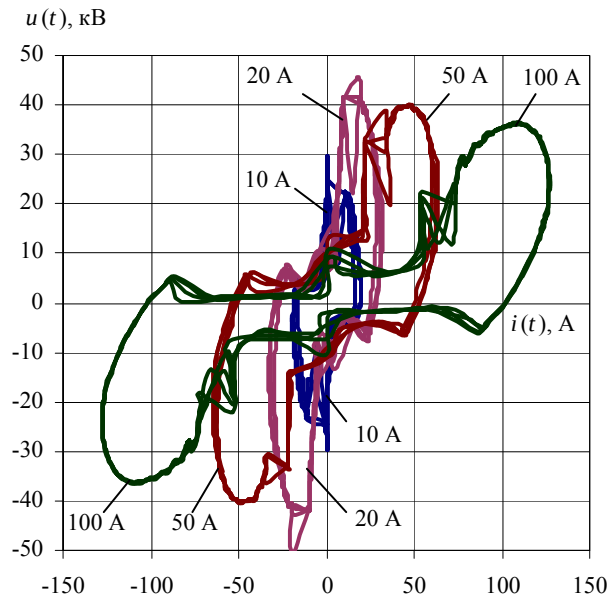


Рис. 8 Статистична модель електровозу 2ЕС5К

$$U_t = \begin{bmatrix} u_1(0) & u_2(0) & \dots & u_n(0) \\ u_1(t_1) & u_2(t_1) & \dots & u_n(t_1) \\ u_1(t_2) & u_2(t_2) & \dots & u_n(t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_1(T) & u_2(T) & \dots & u_n(T) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$I_t = \begin{bmatrix} i_1(0) & i_2(0) & \dots & i_n(0) \\ i_1(t_1) & i_2(t_1) & \dots & i_n(t_1) \\ i_1(t_2) & i_2(t_2) & \dots & i_n(t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ i_1(T) & i_2(T) & \dots & i_n(T) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Кількість рядків цих матриць дорівнює кількості інтервалів дискретизації на одному періоді основної частоти. В частотному діапазоні від 0 до 2 кГц відповідно до теореми Котельникова (Найквіста) достатньо взяти 128 точок на відрізок в 0,02 с.

Кількість стовбців U_t та I_t визначається розмірністю вектора відповідних діючих значень струмів електровозу I_n , які обчислюються за формулою

$$I_n = \sqrt{\frac{\frac{1}{T}(I_{t,1}^2 + I_{t,2}^2 + \dots + I_{t,n}^2)}{\frac{1}{T}(I_{t,1}^2 + I_{t,2}^2 + \dots + I_{t,n}^2)}}. \quad (4)$$

В результаті апроксимації приведених залежностей за допомогою складених матриць можуть бути отримані характеристики функціонування електротягового навантаження [3].

Результати порівняння розрахованих активної та обмінної характеристик для електровоза ВЛ80Т та для електровоза ВЛ80С, отриманих в [4] приведені на рис. 10, 11.

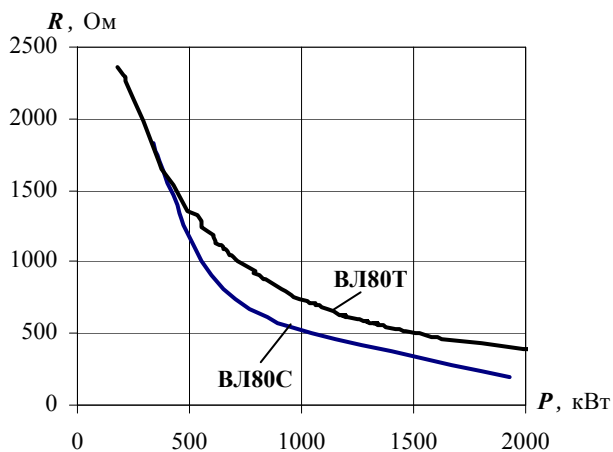


Рис. 10. Активні характеристики електровозів в залежності від потужності, що реалізується

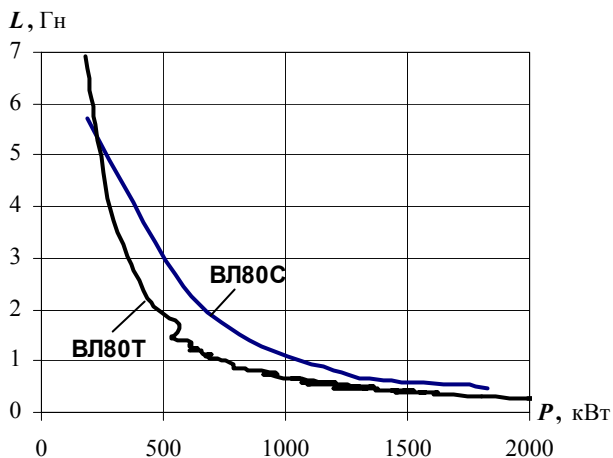


Рис. 11. Обмінні характеристики електровозів в залежності від потужності, що реалізується

Аналіз показує, що активні та обмінні характеристики обох електровозів мають спадаючий характер. Значення активних характеристик практично співпадають при малих значеннях (до 500 кВт) реалізованої потужності, значення ж обмінних характеристик практично співпадають при більш високих значеннях (більше 1400 кВт). Максимальна відмінність активних характеристик складає 3,9 % при потужності 800 кВт, обмінних – 53 % при потужності 500 кВт.

ВИСНОВКИ

1. Уточнено існуючу модель випрямного електровозу змінного струму шляхом врахування характеристики намагнічення сталі тягового трансформатора.

2. Для електровозів змінного струму з керованими перетворювачами запропоновано використовувати статистичні моделі, побудовані на основі дослідних поїздок.

3. Приведено порівняння залежностей активних та обмінних характеристик електровозів змінного струму з випрямними пристроями в режимі тяги. В цілому характеристики мають однотипні тенденції поведінки, максимальні похибки при цьому складають не більше 3,9 % для активної та 53 % для обмінної характеристик.

[1] Мамошин, Р. Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока [Текст] / Р. Р. Мамошин. – М.: Транспорт, 1973.

[2] Мамошин, Р. Р. Влияние поперечной емкостной компенсации на электромагнитные процессы в тяговой сети переменного тока [Текст] / Р. Р. Мамошин, А. П. Милютин, А. В. Фролов, А. И. Щуров // Электричество. – 1984. – № 5.

[3] Косарев, Б. И. Определение параметров устройств электрической тяги по временным характеристикам / Б. И. Косарев, С. В. Ключников, А. В. Фролов, А. И. Щуров // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 3.

[4] Коробков, Г. В. Влияние компенсирующих устройств на режимы тяговых сетей переменного тока [Текст] / Г. В. Коробков // Автореф. дисерт. канд. техн. наук. – Омск. – 2004.

[5] Босий, Д. О. Імітаційне моделювання системи тягового електропостачання для дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях змінного струму [Текст] / Д. О. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 24.

[6] Быстрицкий, Х. Я. Устройство и работа электровозов переменного тока [Текст] / Х. Я. Быстрицкий, З. М. Дубровский, Б. Н. Ребрик. – М.: Транспорт, 1982.

[7] Раков, В. А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1976 – 1985) [Текст] / В. А. Раков. – М.: Транспорт, 1990.

[8] Кулинич, Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения [Текст] / Ю. М. Кулинич // Монография. – Хабаровск. – 2001.