

УДК 621.33:004.942

Т. М. МІЩЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Інтелектуальні системи енергопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. + 38 (099) 136 96 25, ел. пошта mishchenko_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

Методологія та моделі комбінованого моделювання електромагнітних процесів у системах електричної тяги

Мета. Основною метою статті є розробка ідентифікаційних моделей і нового методу моделювання електромагнітних процесів у системах електричної тяги з одночасним урахуванням усіх її підсистем, а також декількох фідерних зон електрифікованої ділянки. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використано методи математичного моделювання, основи теорії випадкових процесів та методику ймовірно-статистичної їх обробки, методи розв'язання інтегральних рівнянь та аналізу електричних тягових кіл у системах електричної тяги. **Результати.** Установлено вимоги, яким має відповідати адекватна, стохастична ідентифікаційна модель пристроїв систем електричної тяги. Виконано розв'язання інтегрального кореляційного рівняння Фредгольма першого роду. Отримано аналітичний вираз ідентифікаційної динамічної моделі електровоза ДЕ–1 та здійснено перевірку її адекватності. Розроблено і представлено в таблиці методологію комбінованого моделювання електромагнітних процесів у пристроях і підсистемах систем електричної тяги. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано використовувати імпульсну перехідну функцію як ідентифікаційну модель тягової підстанції й тягової мережі з електрорухомим складом під час прогнозного моделювання електромагнітних та електроенергетичних процесів у системах електричної тяги. Розроблено новий метод комплексного моделювання електромагнітних та електроенергетичних процесів у системі електричної тяги з одночасним урахуванням усіх її підсистем, а також декількох міжпідстанційних зон електрифікованої ділянки. Уперше запропоновано метод розбивання кореляційних функцій для розв'язання інтегрального кореляційного рівняння, що дозволяє визначити імпульсну перехідну функцію як ідентифікаційну модель будь-якої підсистеми системи електричної тяги. **Практична значимість.** Розроблені ідентифікаційні моделі та метод комбінованого моделювання дають можливість прогнозувати електромагнітні процеси одночасно в усіх фідерних зонах електрифікованої ділянки системи електричної тяги. Отримана ідентифікаційна модель електровоза ДЕ–1 може бути адаптована з подальшим її використанням для моделювання процесів у тягових колах електровозів інших типів. Застосований під час розв'язання інтегрального кореляційного рівняння Вольтерра першого роду (типу згортки) метод факторизації кореляційних функцій може бути адаптований до розв'язання інших інтегральних рівнянь, якими описують процеси в системах електричної тяги.

Ключові слова: підсистема; комбіноване моделювання; ідентифікація; вагова функція; модель; випадковий процес; напруга; електрична тяга; струм

Вступ

Як відомо, від часів заснування й до сьогодні будь-яка система електричної тяги (СЕТ) складається з підсистем: зовнішнього електропостачання (ЗЕП), тягових підстанцій (ТП), тягової мережі (ТМ) та електрорухомого складу (ЕРС). Зазначене та ряд інших факторів обумовлює значну складність, велику потужність, динамічність і стохастичність кожної СЕТ, особливо якщо вона повинна забезпечувати швидкісний ($160 \leq V \leq 200$ км/год) чи високошвидкісний ($V \geq 200$ км/год) рухи поїздів [7]. У цьому

випадку систему тягового електропостачання (СТЕ) постійного струму підсилюють поздовжньою лінією електропередач 24 або 36 кВ постійної напруги, а ЕРС містить: тяговий трансформатор, випрямно-інверторний перетворювач, фільтр, автономний інвертор напруги, асинхронні двигуни. Звідси, суттєво зростає і складність, і нелінійність підсистем, а отже, й усієї СЕТ, що істотно ускладнює математичне моделювання електромагнітних процесів. Тому в наш час аналіз процесів шляхом моделювання («класичного» математичного чи імітаційного) найчастіше здійснюють лише в одній певній підсистемі, а для інших ставлять певні умови,

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

і вони залишаються без уваги. Зрозуміло, що отримані таким чином результати розрахунків мають невисоку точність, оскільки вся СЕТ складається з неперервно електрично зв'язаних (залежних одна від одної) підсистем, охоплених єдиним електромагнітним процесом, і тому потрібно аналізувати всю СЕТ.

З аналізу наявних на сьогодні як вітчизняних, зокрема [1, 5, 10], так і закордонних [14–20] наукових публікацій випливає, що моделювання процесів у СЕТ здійснюють без урахування їх електричного взаємозв'язку в підсистемах і при цьому:

- як моделі ТП використовують джерело постійної чи синусоїдної ЕРС, що увімкнене послідовно з лінійним резистором, інколи додають і лінійний індуктивний елемент. Зрозуміло, що такі прості схеми заміщення не можуть враховувати складні нелінійні динамічні пристрої, якими обладнані ТП. Наприклад, ТП постійного струму мають потужні понижувальний і тяговий трансформатори, випрямно-інверторний агрегат, згладжувальний реактор, пасивний підстанційний фільтр, два швидкодіючих вимикачі;

- аналогічна ситуація і з моделями ЕРС: їх беруть як ідеальне джерело струму чи джерело незмінної активної потужності, значення яких отримують у результаті тягових розрахунків за номінальної напруги на струмоприймачі ЕРС. Недоліки таких схем заміщення ЕРС докладно наведені в [3];

- тягові мережі заміщують відомими електричними схемами з лінійними активними і реактивними елементами, а лінії електропередач й трансформатори в підсистемі ЗЕП – відповідно П-подібною чи Т-подібною схемою заміщення чотириполюсника;

- моделювання електромагнітних процесів у тягових колах підсистем здійснюють лише для детермінованих напруг і струмів у СЕТ, у той час як їх і фідерні, і підстанційні, і в ЕРС величини є випадковими (стохастичними) [6, 16].

Означені вище складності підсистем накладають особливі вимоги до застосовуваних методів моделювання процесів СЕТ, основними з яких є математичне та імітаційне моделювання.

Однак застосування для цієї мети лише методів «класичного» чи комп'ютерного моделювання (як найбільш поширених) є надзвичайно трудомістким, що обумовлено таким [3].

«Класичне» моделювання базується на побудові схеми заміщення досліджуваного пристрою або системи з подальшим математичним описом, згідно із законами електротехніки, фізичних процесів, що протікають у них. Однак аналіз наведених у науковій публікації [7] схемотехнічних рішень частково вже створених і перспективних підсистем тягового електропостачання свідчить, по-перше, про істотну складність навіть їх структурних схем, не кажучи вже про розрахункові схеми заміщення з алгоритмами роботи їх тягових перетворювачів. Отже, закономірна складність і математичних моделей навіть для однієї фідерної зони й одного поїзда на ній. По-друге, практично, як правило, у фідерній зоні рухається кілька поїздів (тобто електропоїздів), а в разі організації швидкісного й високошвидкісного рухів планують узагалі пакетний графік руху поїздів із 5 ... 7 поїздами в пакеті у фідерній зоні. Нарешті, під час аналізу електромагнітних і електроенергетичних процесів у підсистемі тягового електропостачання не можна обмежуватися однією фідерною зоною, потрібно розглядати 7 зон.

Зазначене вище дозволяє стверджувати, що практично неможливо побудувати точну математичну модель такої складної нелінійної динамічної потужної системи, як СТЕ, тільки, як це зараз здійснюють, на основі теоретичного аналізу фізичних процесів, що протікають у пристроях чи підсистемах цієї системи з подальшим використанням законів і методів теоретичної електротехніки. Якраз зазначене практично і гальмує математичне моделювання, а отже, і прогнозування процесів у перспективних СТЕ, особливо тих, як модернізують для впровадження швидкісного й високошвидкісного руху поїздів [6, 16].

У свою чергу, імітаційні моделі є віртуальними, і їх застосування має ряд обмежень, пов'язаних із неадекватністю моделі в умовах існування параметричних елементів у схемі системи, а також із трудомісткістю власне самого процесу моделювання, тим паче випадкових процесів напруг і струмів.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

На нашу думку, вирішення цієї проблеми можливе методами ідентифікації [11], розвиток яких спостерігається останнім часом [8, 18], бо якраз ідентифікація є одним з ефективних методів побудови моделей, по-перше, складних пристроїв (чи систем) і, по-друге, за великої їх кількості (у нашій задачі – ТП, ЕРС, ТМ, фідерні зони). Методи ідентифікації також раціонально застосовувати для моделювання пристроїв (чи систем), які тільки розробляють і про які наявно мають мало апріорної інформації або вона зовсім відсутня.

Тому на підставі розроблених у роботі [11] ідентифікаційних моделей підсистем пропонуємо методологію нового, комбінованого, методу моделювання процесів не лише в одній міжпідстанційній зоні, але і в декількох зонах електрифікованої ділянки певної залізниці.

Мета

Основною метою статті є розробка ідентифікаційних моделей і нового методу моделювання електромагнітних процесів у СЕТ з одночасним урахуванням усіх її підсистем, а також декількох фідерних зон електрифікованої ділянки.

Методика

На сьогодні існує, назвемо його, «роздільне» моделювання, коли дослідження електромагнітних процесів здійснюються в окремих підсистемах. На відміну від цього методу сутність, а отже, і гнучкість запропонованого методу «комбінованого» моделювання полягає в тому, що для складних підсистем (чи окремих пристроїв) типу «чорної скриньки» будують моделі «вхід–вихід» методами ідентифікації, а для інших підсистем цієї ж СЕТ створюють класичні моделі на базі схем заміщення. Наприклад, досліджуючи електротягове навантаження в певній фідерній зоні між ТП1 і ТП2, будують «класичну» математичну модель ТМ (на основі законів теоретичної електротехніки), а моделі ТП1 і ТП2 – методами ідентифікації.

У загальному випадку методологія застосування комбінованого методу представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Методологія застосування комбінованого методу

Table 1

Methodology of using the combined method

№ варіанта	Підсистема, у якій досліджують процеси		Методи моделювання в:			
			ЛЕП, ЗЕП	ТП	ТМ	ЕРС
	Назва	Метод моделювання				
1	ЛЕП ЗЕП	імітаційне	–	ідентифікаційне	класичне	ідентифікаційне
2	ТП	імітаційне	класичне	–	класичне	ідентифікаційне
3	ТМ	–	класичне	ідентифікаційне	–	ідентифікаційне
4	ЕРС	класичне	імітаційне	ідентифікаційне	імітаційне	–

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Рекомендації, наведені в таблиці, щодо використання того чи іншого методу моделювання підсистем у різних варіантах комбінованого методу не є остаточними, можливі їх зміни залежно від заданих параметрів підсистем та поставленої задачі ідентифікації, у вузькому чи широкому змісті [7, 11].

Ідентифікаційні моделі підсистем. Для якісного розв'язання поставленої задачі ідентифікаційна модель досліджуваної підсистеми повинна відповідати таким вимогам:

- бути статистичною, оскільки електромагнітні процеси в СЕТ стохастичні. При цьому визначення оператора (моделі) підсистеми повинно базуватися на поняттях авто- і взаємнокореляційних функцій як найважливіших характеристиках стохастичних процесів;

- відповідати задачі «чорної скриньки», оскільки структури таких складних підсистем, як ТП і ЕРС, невідомі;

- бути лінійною. По-перше, це необхідно, щоб залишатися в рамках кореляційної теорії випадкових процесів, що має широке застосування в разі статистичних розв'язань у техніці. По-друге, нелінійна система (її характеристика) достатньо точно може бути лінеаризована, наприклад, дуже поширеним методом статистичної лінеаризації. Нарешті, якщо вхідний і вихідний процеси підкоряються закону Гаусса (що часто має місце в СТЕ), то в разі виконання критерію мінімуму середньоквадратичної похибки оптимальний лінійний оператор є взагалі оптимальним оператором;

- бути оптимальною за певним критерієм.

Виконання цієї умови обумовлено тим, що в загальному випадку на вхідний «корисний» процес $X(t)$ можуть накладатися різного роду як технічні, так і організаційні, як внутрішні, так і зовнішні щодо підсистем завади $Z(t)$, тобто маємо: $X(t) + Z(t)$. Тому необхідний оператор, який забезпечував би найбільшу динамічну точність перетворення вхідного процесу $X(t)$ у вихідний $Y(t)$ у разі прогнозування останнього, тобто необхідний оптимальний оператор (оптимальна модель). При цьому слід зробити застереження, що вираз «оптимальний оператор» («оптимальна модель») не свідчить про те, що

він (вона) володіє найбільшою можливою точністю своєї роботи в кожному конкретному випадку значень параметрів пристроїв чи підсистем і в будь-який момент часу. Однак за достатньо тривалої їх роботи в різних умовах, для яких вона призначена, точність моделі буде найбільш можливою. Тобто «оптимальна модель» повинна бути оптимальною у середньостатистичному сенсі можливих умов роботи підсистеми. Більше того, у випадку стохастичного характеру вхідного $X(t)$ і вихідного $Y(t)$ процесів задачу визначення «оптимальної моделі» потрібно здійснювати за ймовірнісними характеристиками $X(t)$ і вихідного $Y(t)$ [9]. На практиці статистичних розв'язань задачі оптимізації оператора застосовують ряд критеріїв оптимуму. Однак ще з часів Н. Вінера (1949 р.) й до цього часу, згідно зі значною кількістю публікацій, зокрема [9, 12], якість статистичної оптимальності моделі системи найбільш висока в разі використання критерію середньоквадратичної похибки. Якщо модель (оператор) системи відповідає цьому критерію, тоді квадрат різниці між розрахованим $Y^*(t)$ і реальним $Y(t)$ значеннями вихідного процесу системи за його прогнозування має мінімальну величину:

$$\overline{\varepsilon^2} = M \left\{ \left[Y^*(t) - Y(t) \right]^2 \right\} = \min ,$$

де M – операція математичного очікування.

Виходячи із зазначеного, під час розробки оптимальної моделі ТП, будемо керуватися цим критерієм. Вважають що в разі виконання цього критерію результати, отримані за цією моделлю, будуть найточніше відповідати реальним досліджуваним величинам підсистеми. У цьому випадку модель вважають адекватною, чим і оцінюється її ефективність.

У теорії та практиці прогнозування керування лінійними системами найбільш часто застосовують ідентифікаційні моделі у вигляді «класичних» форм: диференціального або інтегрального оператора, інтегро-диференціального рівняння, числового ряду, імпульсної перехідної функції, передатної або частотної функції, ряду Вольтерра та ін. При цьому вибір виду визначають за структурою досліджуваної системи та змістом поставленого завдання.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

В електротехніці та енергетиці найбільш застосовними операторами (моделями, характеристиками) системи є передатні функції та імпульсна перехідна функція. Передатні функції можна розглядати як основні характеристики лінійної системи, якщо під час аналізу її властивостей користуються площиною комплексного змінного (що характерно під час досліджень усталених процесів). Але найчастіше необхідні дослідження в області дійсної змінної t . У цьому випадку, на думку практично всіх дослідників, за ідентифікаційну модель слід брати імпульсну перехідну (вагову) функцію. При цьому в теорії статистичної динаміки лінійних систем доведено [12], що вагова функція $h(t)$ є оптимальною, якщо її отримано як результат розв'язання інтегрального кореляційного рівняння Фредгольма першого роду:

$$K_{xy}(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) K_x(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

за $-\infty < t < \infty$;
чи рівняння Вінера–Хопфа:

$$K_{xy}(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) K_x(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

за $t > 0$,
де в (1) і (2) $K_x(t)$ і $K_{xy}(t)$ – це авто- і відповідно взаємнокореляційна функції стохастичних процесів $X(t)$ на вході та $Y(t)$ на виході підсистеми.

Отже, враховуючи зазначене вище для отримання виразу вагової функції $h(t)$, як моделі (оператора) підсистеми (чи системи, чи просто її пристрою), необхідно розв'язати рівняння (1) або (2). Ряд методів розв'язання рівняння (2) наведено в роботі [3], тому в цій роботі розглянемо розв'язання рівняння (1), для чого скористаємося методом розбивання кореляційних функцій $K_x(t)$, $K_{xy}(t)$ [11].

Отже, представимо автокореляційну функцію $K_x(t)$ на вході підсистеми у вигляді:

$$K_x(t) = \begin{cases} K_x^+(t) & \text{за } t \geq 0, \\ K_x^-(t) & \text{за } t < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Оскільки, як відомо з [9], $K_x(t)$ функція симетрична, то:

$$K_x^+(t) = K_x^-(t). \quad (4)$$

За аналогією представимо і $K_{xy}(t)$:

$$K_{xy}(t) = \begin{cases} K_{xy}^+(t) & \text{за } t \geq 0, \\ K_{xy}^-(t) & \text{за } t < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Вигляд і характер зміни експериментально отримуваних для підсистем СЕТ функцій $K_x(t)$, $K_{xy}(t)$ [6] показує, що ці функції за $t \leq 0$ є аналітичними функціями й допускають аналітичне продовження на позитивну піввісь. Тоді, виходячи з рівняння (1) для $t < 0$, можемо записати:

$$K_{xy}^-(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau. \quad (6)$$

Відповідно до виразу (3) і в силу симетрії (4) розіб'ємо інтеграл в (1) на два інтеграли:

$$\begin{aligned} K_{xy}^+(t) &= \int_0^t h(\tau) K_x^+(t - \tau) d\tau + \\ &+ \int_t^{\infty} h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau = \\ &= \int_0^t h(\tau) K_x^+(t - \tau) d\tau + \int_0^{\infty} h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau + \\ &+ \int_t^0 h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau - \int_0^t h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau = \\ &= \int_0^t h(\tau) K_x^+(t - \tau) d\tau + \int_0^{\infty} h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau - \\ &- \int_0^t h(\tau) K_x^+(t - \tau) d\tau. \quad (7) \end{aligned}$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Застосувавши процедуру віднімання рівняння (6) із виразу (7), отримуємо інтегральне рівняння Вольтера першого роду у вигляді:

$$K_{xy}^+(t) - K_{xy}^-(t) = \int_0^t h(\tau) \begin{bmatrix} K_x^+(t-\tau) - \\ -K_x^-(t-\tau) \end{bmatrix} d\tau. \quad (8)$$

Рівняння (8) містить різнецеве ядро і тому є інтегральним рівнянням типу згортки, яке розв'язують із застосуванням прямого перетворення Лапласа [4]. Справді, згідно з теоремою Бореля (теоремою згортки) [3], рівняння (8) в операторній формі за Лапасом має вигляд:

$$K_{xy}^+(\bar{p}) - K_{xy}^-(\bar{p}) = H(\bar{p}) [K_x^+(\bar{p}) - K_x^-(\bar{p})]. \quad (9)$$

Звідси передатна функція чи пристрою, чи підсистеми, чи взагалі системи буде записана як:

$$H(\bar{p}) = \frac{K_{xy}^+(\bar{p}) - K_{xy}^-(\bar{p})}{K_x^+(\bar{p}) - K_x^-(\bar{p})}. \quad (10)$$

Оригінал шуканої вагової функції $h(t)$ знаходять за теоремою лишків як обернене перетворення Лапласа від $H(\bar{p})$.

Ідентифікаційна модель електровоза ДЕ1. Користуючись виразом (10) та експериментальними даними кореляційної функції напруги на струмоприймачі $K_u(t)$ електровоза (як вхідного стохастичного процесу) та взаємної кореляційної функції напруги й тягового струму $K_{ui}(t)$, отримаємо вагову функцію $h(t)$ електровоза ДЕ1 як підсистеми СЕТ постійного струму.

Отже, маємо:

$$K_u(t) = 12 \cdot 10^4 \exp[-0,1|\tau|] \text{ В}^2;$$

$$K_{ui}(t) = 4,3 \cdot 10^4 \exp[-0,35|\tau|] \text{ ВА}.$$

Підставивши в (10) складові факторизації цих кореляційних функцій, отримуємо передатну функцію електровоза:

$$H(\bar{p}) = \frac{4,3 \cdot 10^4 \cdot (0,1 + 0,35) \cdot (p + 0,1)}{12 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 0,1(p + 0,35)}, \quad (11)$$

Тоді шукана вагова функція буде:

$$h(t) = L^{-1} [H(\bar{p})] = -0,806 \cdot \delta(t) + 0,202 \exp(-0,35t) \text{ См}, \quad (12)$$

де $\delta(t)$ – функція Дірака.

Для перевірки адекватності цієї моделі за формулою

$$m_l = \int_0^\infty h(\tau) \cdot m_u(t - \tau) d\tau = m_u \int_0^\infty h(t) dt$$

було визначено значення математичного очікування тягового струму m_l електровоза в усталеному режимі роботи. Чисельні розрахунки показали, що за математичного очікування напруги на струмоприймачі $m_u = 3262 \text{ В}$ значення $m_l = 751,2 \text{ А}$, що лише на 0,5 % відрізняється від експериментально отриманої величини 755 А.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше запропоновано використовувати імпульсну перехідну функцію як ідентифікаційні моделі тягової підстанції і тягової мережі з електрорухомим складом під час прогнозного моделювання електромагнітних та електроенергетичних процесів у системах електричної тяги.

Розроблено новий метод, метод комплексного моделювання електромагнітних та електроенергетичних процесів у системі електричної тяги з одночасним урахуванням усіх її підсистем, а також декількох міжпідстанційних зон електрифікованої ділянки.

Уперше запропоновано метод розбивання кореляційних функцій для розв'язання інтегрального кореляційного рівняння, що дозволяє визначати імпульсну перехідну функцію як ідентифікаційну модель будь-якої підсистеми системи електричної тяги.

Розроблені ідентифікаційні моделі та метод комбінованого моделювання дають можливість прогнозувати електромагнітні процеси одночасно в усіх фідерних зонах електрифікованої ділянки системи електричної тяги.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Отримана ідентифікаційна модель електровоза ДЕ 1 може бути адаптована з подальшим її використанням під час моделювання процесів у тягових колах електровозів інших типів.

Застосований під час розв'язання інтегрального кореляційного рівняння Вольтерра першого роду (типу згортки) метод факторизації кореляційних функцій може бути адаптований до розв'язання інших інтегральних рівнянь, якими описують процеси в системах електричної тяги.

Висновки

1. У наявних методах моделювання схеми заміщення пристроїв і підсистем СЕТ не є адекватними, оскільки занадто прості й не володіють здатністю прогнозування досліджених процесів.

2. Складність, нелінійність, стохастичність і динамічність насамперед тягових підстанцій та електрорухомого складу обумовлюють необхідність розробки та застосування моделей і методів ідентифікації як складових комбінованого методу моделювання.

3. Імпульсна перехідна функція оптимальна за критерієм середньоквадратичного відхилення, і тому є адекватною моделлю будь-якого пристрою чи підсистем електричної тяги.

4. Запропонований метод комбінованого моделювання процесів у системах електричної тяги є адекватним і його можна використовувати під час досліджень електромагнітних процесів в інших системах електричного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Босий Д. О., Сиченко В. Г. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму. *Технічна електродинаміка*. 2009. Вип. 4.3. С. 86–89.
2. Закарюкин В. П., Крюков А. В. *Методы совместного моделирования систем тяги и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока*. Иркутск : ИрГУПС, 2010. 160 с.
3. Костин Н. А., Мищенко Т. Н. Стохастическая идентификационная модель прогнозирования параметров устройств систем электрического транспорта. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.007>
4. Краснов М. Л., Киселев А. И., Макаренко Г. И. *Интегральные уравнения*. Москва : Наука, 1968. 192 с.
5. Михайличенко П. Є. *Наукове обґрунтування та розробка заходів підвищення ефективності роботи системи електричної тяги постійного струму при аварійних режимах* : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2013. 24 с.
6. Мищенко Т. Н., Михайличенко П. Є., Костин Н. А. Вероятностные характеристики случайной функции напряжения на токоприемнике первого украинского электровоза ДЭ 1. *Електротехніка і електромеханіка*. 2003. № 2. С. 43–46.
7. Мищенко Т. М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів. *Електротехніка і Електроенергетика*. 2014. № 1. С. 19–28.
8. Новицкий И. В., Слесарев В. В., Малієнко А. В. Метод ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів керування підготовчими процесами перед збагаченням руд. *Науковий вісник НГУ*. 2020. № 2. С. 42–46. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/042>
9. Пугачев В. С. *Теория случайных функций и её применение к задачам автоматического управления*. Москва : Физматгиз, 1962. 659 с.
10. Сиченко В. Г., Ряботинь Б. А., Словак О. Д. Моделювання електромагнітних процесів перетворення електричної енергії на тяговій підстанції постійного струму. *Технічна електродинаміка*. 2011. С. 245–250.
11. *Современные методы идентификации систем* / под ред. П. Эйхоффа. Москва : Мир. 1983. 400 с.
12. Солодовников В. В. Статистическая динамика систем автоматического управления. Москва : Физматгиз, 1960. 655 с.
13. Alnuman H., Gladwin D., Foster M. Electrical modellir system with multiple trains. *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 11. P. 3211–3231. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113211>

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

14. Jabr R. A., Dzaifc I. Solution of DC Railway Traction power flow systems including Limited Network Receptivity. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33. Iss. 1. P. 962–969. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2688338>
15. Kocaarslan İ., Akçay M. T., Ulusoy S. E., Bal E., Tiryaki H. Creation of a dynamic model of the electrification and traction power system of a 25 kV AC feed railway line together with analysis of different operation scenarios using MATLAB/Simulink. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2017. Vol. 25. P. 4254–4267. DOI: <https://doi.org/10.3906/elk-1612-84>
16. Kostin, M., Mishchenko, T., & Hoholyuk, O. (2020). Fryze Reactive Power in Electric Transport Systems with Stochastic Voltages and Currents. *2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. (Pinczow, 16-19 September 2020). Pinczow, 2020. P. 1–4.
17. Mao F., Mao Z., Yu K. The Modelling and Simulation of DC Traction Power Supply Network for Urban Rail Transit Based of Simulink. *Journal of Physics : Conference Series*. 2018. Volume 1087. Iss. 4. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1087/4/042058>
18. Minucci S., Pagano M., Proto D. Model of the 2×25 kV high speed railway supply system taking into account the soil-air interface. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018. Vol. 95. P. 644–652.
19. Shang J., Zhang J., Zhang Z. Optimizational Mathematical Modeling Methods of DC Traction Power Supply System for Urban Mass Transit. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. Vol. 2018. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3084184>
20. Sisay M. *Modeling and Simulation of Traction Power Supply System*. 2017. URL: <http://etd.aau.edu.et/bitstream/handle/123456789/15217/Molalegn%20Sisay.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

T. M. MISHCHENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Intelligent Power Supply Systems», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 136 96 25, e-mail mishchenko_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

Methodology and Models of Combined Modeling of Electromagnetic Processes in Electric Traction Systems

Purpose. The main purpose of the work is the development of identification models and a new method of modeling electromagnetic processes in electric traction systems with simultaneous consideration of all its subsystems, as well as several feeder zones of the electrified section. **Methodology.** To achieve this purpose, the methods of mathematical modelling, the basics of the theory of random processes and the methodology of their probabilistic-statistical processing, the methods for solving integral equations and analysis of electric traction circuits in electric traction systems are used. **Findings.** The requirements to be met by an adequate, stochastic identification model of electric traction devices are established. The solution of Fredholm's integral correlation equation of the first kind is performed. The analytical expression of the identification dynamic model of the electric locomotive DE–1 is obtained and its adequacy is checked. The methodology of combined modeling of electromagnetic processes in devices and subsystems of electric traction systems is developed and presented tabularly. **Originality.** For the first time it is proposed to use the pulse transition function as identification models of traction substation and traction network with electric rolling stock in predictive modeling of electromagnetic and electric power processes in electric traction systems. A new method has been developed, a method of complex modeling of electromagnetic and electric power processes in the system of electric traction with simultaneous consideration of all its subsystems, as well as several inter-substation zones of the electrified section. For the first time, a method of partitioning the correlation functions for solving an integral correlation equation has been proposed, which allows defining a pulse transition function as an identification model of any subsystem of an electric traction system. **Practical value.** The developed identification models and the method of combined modeling make it possible to predict electromagnetic processes simultaneously in all feeder zones of the electrified section of the electric traction system. The obtained identification model of the electric locomotive DE–1 can be adapted with its subsequent use in modeling processes in the traction circuits of electric locomotives.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

tives of other types. The method of factorization of correlation functions used in solving the Volterra integral correlation equation of the first kind (convolution type) can be adapted to the solution of other integral equations, which describe the processes in electric traction systems.

Keywords: subsystem; combined modeling; identification; weight function; model; random process; voltage; electric traction; current

REFERENCES

1. Bosiy, D. O., & Sichenko V. G. (2009). Matematychnye modelyuvannya elektrotyagovogo navantazhennya v zadachax vyvchennya elektromagnitnykh procesiv dlya system elektropostachannya elektrychnogo transportu zminnogo strumu. *Texnichna elektrodynamika*, 4.3, 86-89. (in Ukrainian)
2. Zakaryukin, V. P., & Kryukov, A. V. (2010). *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagi i vneshnego elek-trosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka*. Irkutsk: IrGUPS. (in Russian)
3. Kostin, M., & Mishchenko, T. (2019). Stochastic identification model for forecasting of parameters of devices of electric transport systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 1, 7-15. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.007> (in Russian)
4. Krasnov, M. L., Kiselev, A. I., & Makarenko, G. I. (1968). *Integralnye uravneniya*. Moscow: Nauka. (in Russian)
5. Mikhalichenko, P. Ye. (2013). *Naukove obgruntuvannya ta rozrobka zaxodiv pidvyshhennya efektyvnosti roboty systemy elektrychnoyi tyagy postijnogo strumu pry avarijnykh rezhymax* (Extended abstract of PhD dissertation). Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian)
6. Mishchenko, T. M., Mikhalichenko, P. Ye., & Kostin, N. A. (2003). Veroyatnostnye kharakteristiki sluchaynoy funk-tsii napryazheniya na tokopriemnike pervogo ukrainskogo elektrovoza DE 1. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2, 43-46. (in Russian)
7. Mishchenko, T. M. (2014). The prospects of the technical solutions and modeling systems of electric traction in high-speed trains. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 1, 19-28. (in Ukrainian)
8. Novitskiy, I., Sliesarev, V., & Maliienko, A. V. (2020). Method of identification of nonlinear dynamic control objects of preparatory processes before ore dressing. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 42-46. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/042> (in Ukrainian)
9. Pugachev, V. S. (1962). *Teoriya sluchaynykh funktsiy i ee primenenie k zadacham avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow: Fizmatgiz. (in Russian)
10. Sichenko, V. G., Riabokon, B. A., & Slovak, A. D. (2011). Simulation of electromagnetic processes of conversion of electric power at the DC traction substation. *Tekhnichna elektrodynamika*, 245-250. (in Ukrainian)
11. Eykhoff, P. (Ed.). (1983). *Sovremennye metody identifikatsii sistem*. Moscow: Mir. (in Russian)
12. Solodovnikov, V. V. (1960). *Statisticheskaya dinamika sistem avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow: Fizmatgiz. (in Russian)
13. Alnuman, H., Gladwin, D., & Foster, M. (2018). Electrical Modelling of a DC Railway System with Multiple Trains. *Energies*, 11(11), 3211-3231. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113211> (in English)
14. Jabr, R. A., & Dzafic, I. (2018). Solution of DC Railway Traction Power Flow Systems Including Limited Network Receptivity. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(1), 962-969. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2688338> (in English)
15. Kocaarslan, İ., Akçay, M. T., Ulusoy, S. E., Bal, E., & Tiryaki, H. (2017). Creation of a dynamic model of the electrification and traction power system of a 25 kV AC feed railway line together with analysis of different operation scenarios using MATLAB/Simulink. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25, 4254-4267. DOI: <https://doi.org/10.3906/elk-1612-84> (in English)
16. Kostin, M., Mishchenko, T., & Hoholyuk, O. (2020). Fryze Reactive Power in Electric Transport Systems with Stochastic Voltages and Currents. In *2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)* (pp. 1-4). Pinczow, Poland. (in English)
17. Mao, F., Mao, Z., & Yu, K. (2018). The Modeling and Simulation of DC Traction Power Supply Network for Urban Rail Transit Based on Simulink. *Journal of Physics: Conference Series*, 1087(4), 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1087/4/042058> (in English)
18. Minucci, S., Pagano, M., & Proto, D. (2018). Model of the 2 × 25 kV high speed railway supply system taking into account the soil-air interface. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 95, 644-652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.017> (in English)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

19. Shang, J., Zhang, J., & Zhang, Z. (2018). Optimizational Mathematical Modeling Methods of DC Traction Power Supply System for Urban Mass Transit. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3084184> (in English)
20. Sisay, M. (2017). *Modeling and Simulation of Traction Power Supply System*. Retrieved from <http://etd.aau.edu.et/bitstream/handle/123456789/15217/Molalegn%20Sisay.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (in English)

Надійшла до редколегії: 16.11.2020

Прийнята до друку: 15.03.2021