

УДК 621.333:621.318.3

Т. М. МІЩЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (097) 485 68 21, ел. пошта mishchenko_tn@ukr.net

МЕТОДИ АНАЛІЗУ СТОХАСТИЧНИХ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ

Мета. Викладено сутності та основні характеристики методів розрахунку перехідних електромагнітних процесів в елементах і пристроях нелінійних динамічних систем електричної тяги з урахуванням стохастичного характеру зміни напруг і струмів в тягових мережах підсистеми електропостачання і в силових колах електрорухомого складу. **Методика.** Дослідження виконано за класичними методами і методиками нелінійної електротехніки і теорії ймовірностей, зокрема, за методиками застосування стаціонарних ергодичних і нестаціонарних випадкових процесів. **Результати.** Користуючись викладеними методами, представлено схему заміщення і систему нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь електромагнітного стану двоколісної міжпідстанційної зони системи електричної тяги змінного струму; їх розрахунки дозволяють отримати електротягове струморозподілення на ділянках фідерних зон. **Наукова новизна.** З наукової точки зору робота цікава і важлива, по-перше, тим, що методи дозволяють врахувати імовірнісний характер зміни тягових напруг і струмів системи електротяги. По-друге, проведені дослідження дозволяють створити найбільш ефективний метод аналізу нелінійних кіл. **Практична значимість.** Практична цінність даного дослідження полягає у застосуванні викладених методів до аналізу електромагнітних та електроенергетичних процесів у системі тягового електропостачання у випадках швидкісного руху поїздів.

Ключові слова: аналітичні методи моделювання; електромагнітні процеси; нелінійна динамічна система; електрифікована ділянка; перехідні режими; електровоз

Вступ

Однією з проблем в системах електричної тяги, яка до теперішнього часу практично не вирішувалась, є дослідження перехідних електромагнітних, особливо аварійних, процесів при наявності на фідерній зоні декількох поїздів, тобто декількох одиниць електрорухомого складу (ЕРС), що є реальною ситуацією в графіці руху поїздів. Особливо це типово для швидкісного і високошвидкісного рухів з їх пакетними графіками проходження поїздів. Завдання ускладнюється тим, якщо, по-перше, необхідно врахувати вплив декількох ЕРС, ведучих поїзди і по другій колії міжпідстанції зони і, по-друге, якщо електровози, обладнані асинхронним приводом (типу ДС 3), мають тим самим схемотехніку значно складнішу, ніж у існуючих випрямних електровозів серії ВЛ 60 і ВЛ 80.

Мета і задачі досліджень

Метою роботи є викладення сутності та основних характеристик методів розрахунку перехідних електромагнітних процесів в нелі-

нійних силових колах систем електричної тяги з урахуванням випадкового характеру змінних напруг і струмів.

Для дослідження поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

- 1) виконати систематизацію існуючих методів нелінійної електротехніки;
- 2) проаналізувати ступінь нелінійності елементів пристроїв тягового електропостачання та електрорухомого складу;
- 3) встановити характер стохастичної зміни процесів тягових напруг і струмів (стаціонарність, ергодичність, нестаціонарність);
- 4) викласти сутність, переваги та недоліки методів лінеаризації;
- 5) викласти сутність та основні характеристики методів, що засновані на безпосередньому інтегруванні нелінійних інтегро-диференціальних рядів;
- 6) зробити висновок відносно можливості визначення за допомогою розглянутих методів законів розподілення напруг і струмів в нелінійних тягових колах.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Методи і методики аналізу

Дослідження виконано на основі методів і методик нелінійної електротехніки та теорії випадкових процесів. Схема заміщення складена для двоколіїної міжпідстанційної зони з двостороннім живленням.

Задача аналізу електромагнітних процесів в системі електротяги зводиться до того, що за заданими імовірнісними характеристиками випадкових величин параметрів кола системи електротяги і ЕРС тягового трансформатора необхідно визначити імовірнісні характеристики фідерних струмів і струморозподілення між поїздами в різних режимах. Тобто, при дослідженнях перехідних електромагнітних процесів в системах електричної тяги необхідно розв'язувати задачі статистичної динаміки нелінійних систем. Для розв'язання таких задач у теперішній час у математиці поки що не існує точних аналітичних методів навіть для детермінованих вхідних дій, а при випадковій вхідній дії труднощі зростають у багато разів [2, 3, 5, 6, 10, 11, 14, 15]. Тому для розв'язання поставленої задачі треба застосовувати наближені методи, основні з яких приведені нижче.

1. Методи «звичайної» (простої) лінеаризації. У випадку, коли дисперсія значень параметрів вузька, тобто, коли елементи системи є не суттєво нелійними, і перша похідна вхідної дії до системи достатньо мала за модулем, тоді застосовують методи «звичайної» лінеаризації характеристик нелінійних елементів системи [14, 15]. Він полягає у тому, що спочатку знаходять розв'язання нелінійного диференціального рівняння при відсутності малої випадкової дії, а потім рівняння лінеаризують відносно малих випадкових відхилень ΔI шуканої випадкової величини, наприклад, струму $I(t)$ процесу, від збурених значень параметрів. Нелійними членами, які містять ці випадкові відхилення, нехтують. У результаті для випадкових відхилень утворюється лінійне диференціальне рівняння, яке розв'язують відомими методами. Далі знаходять імовірнісні характеристики для ΔI з наступним переходом до імовірнісних характеристик вихідного процесу $I(t)$.

Метод лінеаризації дозволяє значно просте визначення математичного сподівання та кореляційної функції шуканого процесу $I(t)$ в стаціо-

нарному та нестационарному режимах. Однак при негаусовому збуренні дуже складно (наприклад, методом визначення моментів) знайти навіть одномірну густину імовірності для $I(t)$.

2. Методи стохастичної лінеаризації. Для нелінійних систем, які містять суттєво нелінійні елементи, імовірнісні характеристики принципово не можуть бути лінеаризовані, тому що немає простого зв'язку між математичними очікуваннями і відповідно кореляційними функціями вхідної дії та вихідних величин $I(t)$. В цих задачах доцільним і єдино можливим є застосування інших методів, ніж методів простої лінеаризації і, зокрема, методу статистичної лінеаризації [3, 6, 11–13]. В основі цього методу лежить ідея такої лінеаризації характеристик нелінійних елементів системи, при якій статистичні характеристики (математичне очікування і кореляційна функція) вихідних величин $I_k(t)$ співпадали б з аналогічними імовірнісними характеристиками нелінійних елементів або були б найбільш близькі до них. Тоді для визначення випадкової функції $I(t)$ на виході системи формально маємо лінеаризовані рівняння, для розв'язання яких можливо застосування апарату лінійної теорії. А поєднання використання коефіцієнтів статистичної лінеаризації для нелінійних елементів і методу Дункана [13, 18] призводить до найбільш простого і закінченого розв'язання задачі визначення перших двох статистичних моментів шуканих величин $I_i(t)$.

Практика застосування методу статистичної лінеаризації показує, що він найбільш ефективний, простий і знаходить широке використання при аналізі простих систем, причому в усталеному режимі їх роботи [6, 12]. При дослідженнях складних систем [7] він громіздкий, а, головне, при розв'язанні деяких задач метод дає не тільки великі помилки, але й якісно невірні результати [12]. Крім цього, метод статистичної лінеаризації передбачає наперед визначену густину імовірності вихідного процесу за нормальним законом. Але, як доводять автори [3], у складних динамічних системах, що містять, як правило, інерційні нелінійні елементи, функцію розподілення густини імовірності вихідного процесу можна приблизно вважати за законом Гаусса; спрощує цю проблему також застосування перетворення Гільберта [19].

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Для аналізу складних систем більш застосовані методи, що засновані на безпосередньому інтегруванні нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь, які описують стан системи, і, перш за все, метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло) і метод еквівалентних збурень (метод не випадкових дій).

3. Метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло). Суть цього методу [6, 12, 13] зводиться до уведення випадкових реалізацій вхідних випадкових функцій або параметрів на відповідні входи досліджуваної системи. На кожен із входів системи при одному випробуванні повинна бути подана одна реалізація вхідного збурення, при цьому буде отримана реалізація кожної з вихідних величин. Повторюючи подібні випробування багато разів, отримаємо для кожної з вихідних величин сукупність реалізацій. Піддаючи далі ці сукупності статистичній обробці, визначаємо закони розподілу вихідних величин або, що простіше, окремі характеристики цих законів. Для відтворення та уведення вхідних збурень разом із використанням реальних записів їх реалізацій застосовується фізичне або математичне моделювання випадкових функцій і параметрів. Очевидними достоїнствами цього методу є універсальність і простота. Разом із тим недоліком методу статистичних випробувань є необхідність накопичення великих масивів вихідних величин системи, що пов'язане з виконанням значного об'єму обчислень. Для того, щоб отримати закони розподілу вихідних величин системи або хоч би їх окремі характеристики з прийнятою для практики точністю, потрібно обчислити сотні і навіть тисячі значень цих величин. Тобто, метод об'ємний і трудомісткий, оскільки приходится багаторазово чисельно інтегрувати систему диференціальних рівнянь для різних варіантів значень вхідних випадкових величин із подальшою статистичною обробкою отриманих реалізацій шуканих величин.

4. Метод еквівалентних збурень (метод не випадкових дій). Суть цього методу зводиться до того, що замість випадкових реалізацій параметрів, які використовуються в методі статистичних випробувань, заздалегідь розраховують ξ_{js} ($j = 1, 2, \dots, m; s = 1, 2, \dots, N$) не випадкових величин, так звані еквівалентні збурення [6, 13]. Останні уводяться на відповідні входи досліджуваної нелінійної системи, при цьому шляхом обчислень або моделювання визнача-

ють деякі значення Y_s вихідної величини. З величин Y_s формують шукані імовірнісні характеристики величини Y .

Очевидно, що основною задачею, яка виникає в методах еквівалентних збурень, є таке визначення величин, при яких забезпечувалася би простота обчислення шуканих вірогідних характеристик вихідних величин системи, і була б потрібна порівняно невелика кількість розв'язків рівнянь досліджуваної системи. Складною проблемою в методі еквівалентних збурень є оцінка точності результату, оскільки, зазвичай, в реальних задачах заздалегідь невідомо, якого ступеню поліном з достатньою точністю апроксимує залежність шуканої величини від випадкових параметрів. Тому ступінь апроксимуючого полінома доводиться вибирати переважно емпірично, шляхом проб і порівнянь результатів між собою.

Слід відмітити, що за трудомісткістю при малих значеннях параметру переважає метод еквівалентних збурень, а при великих значеннях – метод Монте-Карло.

5. Метод марковських процесів. Якщо вхідна дія $U(t)$ являє собою гаусовий процес великої інтенсивності, то можливо застосування методу марківських процесів [12, 14]. Зокрема, для аналізу поведінки динамічних систем з марковським вихідним процесом можливо застосувати рівняння Фоккера–Планка–Колмогорова. Метод марківських процесів навіть у суттєво нелінійних задачах принципово дозволяє знаходити густину імовірності вихідного процесу $I(t)$. Однак існує складність фактичного отримання розв'язку цим методом для конкретної задачі, яка суттєво залежить від порядку диференціального рівняння, що описує поведінку системи, виду початкових і граничних умов. Крім цього, метод марковських процесів застосовується лише, якщо зовнішня дія некорельована. Строго кажучи, жоден із реальних процесів суттєво нелінійної динамічної системи не є марковським, тому розглянутий метод дає дуже наближений розв'язок.

6. Квазістатичний метод. У деяких задачах можливе зведення інерційного нелінійного елемента до безінерційного, і тоді обмежуються розв'язанням у квазістатичному наближенні, тобто, так званим, квазістатичним методом [12, 14, 15]. Останній характеризується тим, що в першому наближенні нехтують часовою

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

похідною в диференціальному рівнянні системи. Після чого задача зводиться до розв'язання нелінійного рівняння з безінерційним елементом. У цьому методі також передбачається, що зовнішня випадкова дія змінюється настільки повільно, що система безінерційно відслідковує її.

7. Методи функціональних рядів [2, 4, 12, 14, 15]. Певний практичний інтерес представляє метод функціональних рядів. Ідея методу полягає в представленні функції густини імовірності вихідного процесу у вигляді ряду з ортогональними поліномами з наступним розв'язанням задачі за допомогою цих рядів. У вигляді найбільш практично застосовуваних рядів слід назвати: ряд Грам-Шарл'є з поліномами Ерміта; ряд Юнга [2, 4]; асиметричне гаусове розподілення за Бернштейном [1]; ряд Хаара [9] та ін. Метод призводить до достатньо громіздких алгоритмів обчислення коефіцієнтів розкладання. Однак у деяких окремих задачах, які мають практичне застосування, можливі значні спрощення. Складним питанням залишається оцінка збіжності зазначених рядів [14, 15].

При розв'язанні багатьох нелінійних задач у випадку, коли диференціальні рівняння містять випадкові функції, потрібно будувати (або розкладати) реалізації цих функцій (найчастіше, напругу $U(t)$ чи е.р.с. $E(t)$) за відомими їх імовірнісними характеристиками. Найчастіше цю проблему вирішують шляхом представлення випадкової функції у формі детермінованих функцій випадкових величин. Підставою для такої заміни є теорема, що передбачає для будь-якої випадкової функції, неперервної в інтервалі (a, b) , справедливе розкладання [12]:

$$X(t) = \bar{x}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} V_j \frac{\varphi_j(t)}{\sqrt{\lambda_j}},$$

де V_j – взаємно некорельовані випадкові величини, що володіють нульовими математичними очікуваннями і одиничними дисперсіями;

λ_j і $\varphi_j(t)$ – власні числа і власні функції

інтегрального рівняння: $\varphi_j(t) = \int_a^b K_x(t, \tau) \varphi_j(\tau) dt$.

Також застосовують представлення за методом Карунена, Котельникова і за допомогою узагальнених рядів Фур'є [17] або канонічних розкладань Пугачова [6]. В останні роки най-

більш поширеним є інтерполяційний метод неканонічних розкладань за методом Доступова [3] або за методом Чернецького [17]. Порівняльна характеристика цих методів розкладання докладно подана в [17, с. 142].

Насамкінець треба зауважити, що складність розрахунку стохастичних перехідних процесів у нелінійних динамічних системах (виду електротяги) за допомогою навіть викладених вище методів змушує дослідників нерідко відмовлятися від визначення законів розподілення вихідних величин та обмежуватися розрахунками лише перших декількох моментів їх функцій розподілення, тобто знаходити лише моментні функції, які в багатьох практичних випадках дають достатньо повне, в ряді випадків навіть вичерпне, уявлення про досліджуваний випадковий процес.

Результати застосування методів

На рис. 1 у якості прикладу, приведена схема двостороннього живлення міжпідстанційної двоколіної зони, в якій три поїзда рухаються в одному напрямку, а два – в протилежному. Поїзди ведуть електровози, схеми заміщення яких прийняті згідно з дослідженнями, приведеними в роботі [8].

Як випливає із рис. 1, нелінійна динамічна система електричної тяги схемотехнічно містить нелінійні як безінерційні (активні), так і інерційні (реактивні), до того ж параметричні, елементи, які є випадковими величинами, а вхідна дія, тобто ЕРС фази тягового трансформатора на тяговій підстанції або її вихідна напруга, являється випадковою функцією. Тому електромагнітні процеси в такій динамічній системі описуються складною (навіть без врахування явища взаєміндукції між контурами системи кола) системою стохастичних нелінійних диференціальних рівнянь, наприклад, для схеми рис. 1, вигляду:

$$i_{t1} - i_{t2} - i_1 = 0, \quad (1)$$

$$i_{t2} - i_{t3} - i_2 = 0, \quad (2)$$

$$i_{t3} - i_{t0} - i_3 = 0, \quad (3)$$

$$i_{t4} - i_{t5} - i_4 = 0, \quad (4)$$

$$i_{t5} - i_{t6} - i_5 = 0, \quad (5)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

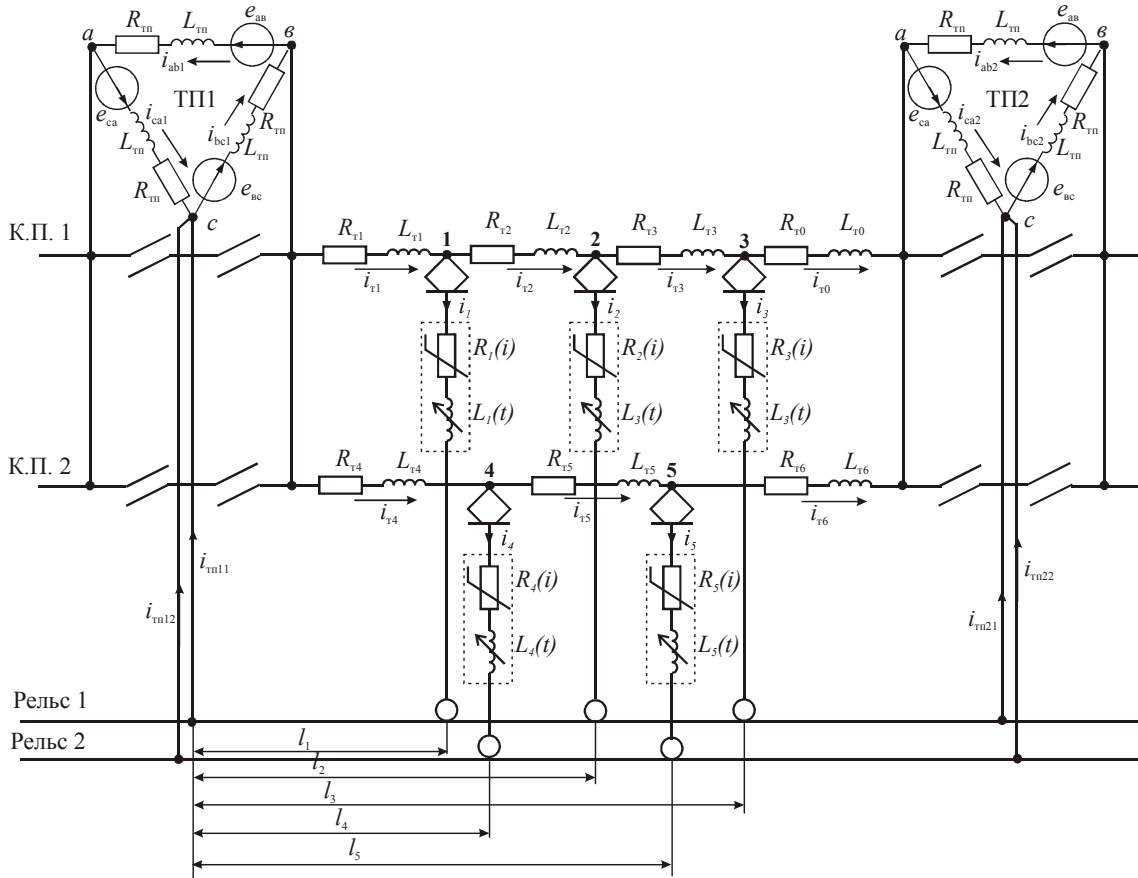


Рис. 1

$$-i_{ab1} + i_{bc1} - i_{r1} - i_{r4} = 0, \quad (6)$$

$$-i_{bn1} + i_{ca1} + i_{\delta r1} = 0, \quad (7)$$

$$-i_{ab2} - i_{ca2} + i_{r0} + i_{r6} = 0, \quad (8)$$

$$-i_{bn2} + i_{ca2} + i_{\delta r2} = 0, \quad (9)$$

$$R_{тн} i_{bc1} + L_{тн} \frac{di_{bc1}}{dt} + R_{r1} i_{r1} + L_{r1} \frac{di_{r1}}{dt} + R_1(i) i_1 + L_1(t) \frac{di_1}{dt} = e_{bc}(t), \quad (10)$$

$$-R_1(i) i_1 - L_1(t) \frac{di_1}{dt} + R_{r2} i_{r2} + L_{r2} \frac{di_{r2}}{dt} + R_2(i) i_2 + L_2(t) \frac{di_2}{dt} = 0, \quad (11)$$

$$-R_2(i) i_2 - L_2(t) \frac{di_2}{dt} + R_{r3} i_{r3} + L_{r3} \frac{di_{r3}}{dt} + R_3(i) i_3 + L_3(t) \frac{di_3}{dt} = 0, \quad (12)$$

$$R_{r0} i_{r0} + L_{r0}(t) \frac{di_{r0}}{dt} + R_{тн} i_{ca2} + L_{тн} \frac{di_{ca2}}{dt} - R_3(i) i_3 - L_3(t) \frac{di_3}{dt} = e_{ca}(t), \quad (13)$$

$$R_{r4} i_{r4} - L_{r4} \frac{di_{r4}}{dt} + R_4(i) i_4 + L_4(t) \frac{di_4}{dt} - R_{тн} i_{ca1} - L_{тн} \frac{di_{ca1}}{dt} - R_{тн} i_{ab1} - L_{тн} \frac{di_{ab1}}{dt} = -e_{ca2}(t) - e_{ab2}(t), \quad (14)$$

$$-R_4(i) i_4 - L_4(t) \frac{di_4}{dt} + R_{r5} i_{r5} + L_{r5} \frac{di_{r5}}{dt} + R_5(i) i_5 + L_5(t) \frac{di_5}{dt} = 0, \quad (15)$$

$$-R_5(i) i_5 - L_5(t) \frac{di_5}{dt} + R_{r6} i_{r6} + L_{r6} \frac{di_{r6}}{dt} - R_{тн} i_{ab2} - L_{тн} \frac{di_{ab2}}{dt} - R_{тн} i_{bc2} - L_{тн} \frac{di_{bc2}}{dt} = -e_{ab}(t) - e_{bc}(t). \quad (16)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Наукова новизна та практична цінність

В класичній нелінійній електротехніці, на відміну від лінійної, відсутній універсальний потужний метод розрахунку нелінійних кіл при довірливих, особливо випадкових, електричних величинах. Тому до наукової новизни цієї роботи треба віднести, по-перше, врахування в розглянутих методах стохастичного характеру зміни напруг і струмів в елементах систем електричної тяги. По-друге, не менш важливим, з наукової точки зору, є докладний аналіз викладених методів відносно їх переваг та недоліків, що характеризує ступінь практичної цінності їх застосування для аналізу перехідних електромагнітних процесів в системі електричного транспорту.

Висновки

1. Кожний із розглянутих імовірнісних методів володіє певними своїми перевагами і недоліками, тому не слід шукати загальний метод аналізу, а для розв'язання конкретної задачі необхідно вибрати чи розробити свій найбільш ефективний метод розрахунку електромагнітних процесів.

2. Представлення вхідних до досліджуваної нелінійної системи випадкових функцій у формі детермінованих функцій випадкових величин доцільно здійснювати як у вигляді канонічних, так і неканонічних розкладань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бернштейн, С. Н. Собрание сочинений. Том IV. Теория вероятностей. Математическая статистика / С. Н. Бернштейн. – М. : Наука, 1964. – 577 с.
- Дёч, Р. Нелинейные преобразования случайных процессов / Р. Дёч. – М. : Советское радио, 1965. – 206 с.
- Казаков, И. Е. Статистическая динамика нелинейных автоматических систем / И. Е. Казаков, Б. Г. Доступов – М. : Гос. изд. физ.-мат. лит-ры, 1962. – 331 с.
- Казаков, И. Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой / И.Е. Казаков. – М. : Наука, 1977. – 416 с.
- Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М. : Радио и связь, 1989. – 666 с.
- Лившиц, Н. А. Вероятностный анализ систем автоматического управления : в 2 т. / Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачёв. – М. : Советское радио, 1963. – 2 т.
- Мищенко, Т. М. Підвищення ефективності роботи системи захисту силових кіл електровозу ДЕ 1 на основі досліджень перехідних аварійних електромагнітних процесів : дис. ... к. т. н. / Мищенко Тетяна Миколаївна ; Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – 212 с.
- Мищенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; послідовне з'єднання елементів / Т. М. Мищенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 121–126.
- Переверзев, Е. С. Испытания и надёжность технических систем / Е. С. Переверзев, Ю. Ф. Даниев. – Д. : Ин-т технической механики НАН Украины, 1999. – 224 с.
- Попов, Е. П. Приближённые методы исследования нелинейных автоматических систем / Е. П. Попов, И. П. Пальтов. – М. : Государственное изд-во физ.-мат. лит., 1960. – 780 с.
- Пугачёв, В. С. Теория случайных функций и её применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачёв – М. : Физматгиз, 1960. – 883 с.
- Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников – М. : Наука, 1968. – 463 с.
- Статистические методы в проектировании нелинейных систем автоматического управления ; под ред. Б. Д. Доступова. – М. : Машиностроение, 1970. – 407 с.
- Тихонов, В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1986. – 296 с.
- Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М. : Радио и связь, 1991. – 608 с.
- Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.
- Чернецкий, В. И. Анализ точности нелинейных систем управления / В. И. Чернецкий. – М. : Машиностроение, 1968. – 246 с.
- Duncan, D. B. Response of linear time-dependent systems to random inputs / D. B. Duncan // Journal of Applied Physics. – 1953. – Vol. 24, № 5. – P. 609–611.
- Kuo, F. F. Hilbert transforms and modulation theory / F. F. Kuo, S. L. Freeny // Proc. of the National Electronics Conference. – Chicago, 1962. – P. 61–68.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Т. Н. МИЩЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Электроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (097) 485 68 21, эл. почта mishchenko_tn@ukr.net

МЕТОДЫ АНАЛИЗА СТОХАСТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Цель. Изложены сущность и основные характеристики методов расчета переходных электромагнитных процессов в элементах и устройствах нелинейных динамических систем электрической тяги с учетом стохастического характера изменения напряжений и токов в тяговых сетях подсистемы электроснабжения и в силовых цепях электроподвижного состава. **Методика.** Исследование выполнено с использованием классических методов и методик нелинейной электротехники и теории вероятностей, в частности, методик применения стационарных эргодических и нестационарных случайных процессов. **Результаты.** Пользуясь изложенными методами, составлена схема замещения и система нелинейных интегро-дифференциальных уравнений электромагнитного состояния двухпутной межподстанционной зоны системы электрической тяги переменного тока; их расчеты позволяют получить электротяговое токораспределение на участках фидерных зон. **Научная новизна.** С научной точки зрения работа интересна и важна, во-первых, тем, что данные методы позволяют учесть вероятностный характер изменения тяговых напряжений и токов системы электротяги. Во-вторых, проведенные исследования позволяют создать наиболее эффективный метод анализа нелинейных цепей. **Практическая значимость.** Практическая ценность данного исследования заключается в применении изложенных методов к анализу электромагнитных и электроэнергетических процессов в системе тягового электроснабжения в случаях скоростного движения поездов.

Ключевые слова: аналитические методы моделирования; электромагнитные процессы; нелинейная динамическая система; электрифицированный участок; переходные режимы; электровоз

Т. М. MISHCHENKO^{1*}

^{1*}Dep. “Electric Power Supply of Railroads” Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 485 68 21, e-mail mishchenko_tn@ukr.net

ANALYSIS METHODS OF STOCHASTIC TRANSIENT ELECTRO–MAGNETIC PROCESSES IN ELECTRIC TRACTION SYSTEM

Purpose. The essence and basic characteristics of calculation methods of transient electromagnetic processes in the elements and devices of non–linear dynamic electric traction systems taking into account the stochastic changes of voltages and currents in traction networks of power supply subsystem and power circuits of electric rolling stock are developed. **Methodology.** Classical methods and the methods of non–linear electric engineering, as well as probability theory method, especially the methods of stationary ergodic and non–stationary stochastic processes application are used in the research. **Findings.** Using the above-mentioned methods an equivalent circuit and the system of nonlinear integra-differential equations for electromagnetic condition of the double–track inter-substation zone of alternating current electric traction system are drawn up. Calculations allow obtaining electric traction current distribution in the areas of feeder zones. **Originality.** First of all the paper is interesting and important from scientific point of view due to the methods, which allow taking into account probabilistic character of change for traction voltages and electric traction system currents. On the second hand the researches develop the most efficient methods of nonlinear circuits’ analysis. **Practical value.** The practical value of the research is presented in application of the methods to the analysis of electromagnetic and electric energy processes in the traction power supply system in the case of high-speed train traffic.

Keywords: analytical methods of modeling; electromagnetic processes; nonlinear dynamic system; electrified district; transient modes; electric locomotive

REFERENCES

1. Bernshteyn S.N. *Sobraniye sochineniy. Tom IV: Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika* (Collected works, Vol. IV : Probability theory. Mathematical statistics). Moscow, Nauka Publ., 1964. 577 p.
2. Dech R. *Nelineynyye preobrazovaniya sluchaynykh protsessov* [Non-linear transformations of random processes]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1965. 206 p.
3. Kazakov I.Ye., Dostupov B.G. *Statisticheskaya dinamika nelineynykh avtomaticheskikh sistem* [Statistical dynamics of nonlinear automatic systems]. Moscow, Gos. izd. fiz.-mat. lit-ry Publ., 1962. 331 p.
4. Kazakov I.Ye. *Statisticheskaya dinamika sistem s peremennoy strukturoy* [Statistical dynamics of systems with alternating structure]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 416 p.
5. Levin B.R. *Teoreticheskiye osnovy statisticheskoy radiotekhniki*. [Theoretical foundations of statistical radio-technics]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1989. 666 p.
6. Livshits N.A., Pugachev V.N. *Veroyatnostnyy analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya v 2 t.* [Probabilistic analysis of automatic control system in 2 volumes]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1963.
7. Mishchenko T.M. *Pidvyshchennia efektyvnosti roboty systemy zakhystu sylovykh kil elektrovozu DE 1 na osnovi doslidzhen perekhidnykh avariinykh elektromagnitnykh protsesiv*. Kand. Diss. [Efficiency enhancement of security system operation of power circuits of DE electric locomotive on the basis of transient emergency electro-magnetic processes. Cand. Diss.]. Dnipropetrovsk, 2007. 212 p.
8. Mishchenko T.M. *Teoretychni aspekty ta metody identyfikatsii parametriv prystroiv systemy elektrychnoi tiahly. Metod mittievych potuzhnostey; poslidovne ziednannya elementiv* [Theoretical aspects and methods of the parameters identification of the electric propulsion system devices. The swing capacity method; the series connection of the elements]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dniepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 121–126.
9. Pereverzev Ye.S., Daniyev Yu.F. *Ispytaniya i nadezhnost tekhnicheskikh sistem* [Testing and reliability of technical systems]. Dnipropetrovsk, Ins-t tekhnicheskoy mekhaniki NAN Ukrainy Publ., 1999. 224 p.
10. Popov Ye.P., Platov I.P. *Priblizhennyye metody issledovaniya nelineynykh avtomaticheskikh sistem* [Approximate methods for nonlinear automatic systems research]. Moscow, Gos. izd. fiz.-mat. lit-ry Publ., 1960. 780 p.
11. Pugachev V.S. *Teoriya sluchaynykh funktsiy i yeye primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [Random functions theory and its application to the tasks of automatic control]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960. 883 p.
12. Sveshnikov A.A. *Prikladnyye metody teorii sluchaynykh funktsiy* [Applied approaches of the random functions theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 463 p.
13. Dostupov B.D. *Statisticheskiye metody v proektirovanii nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Statistical methods in the nonlinear systems of automatic control design]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1970. 407 p.
14. Tikhonov V.I. *Nelineynyye preobrazovaniya sluchaynykh protsessov* [Nonlinear transformations of random processes]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1986. 296 p.
15. Tikhonov V.I., Kharisov V.N. *Statisticheskyy analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem* [Statistical analysis and synthesis of wireless devices]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1991. 608 p.
16. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical radiotechnics]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982. 624 p.
17. Chernetskiy V.I. *Analiz tochnosti nelineynykh sistem upravleniya* [Accuracy analysis of nonlinear control systems]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1968. 246 p.
18. Duncan D.B. Response of linear time-dependent systems to random inputs. *Journal of Applied Physics*, 1953, vol. 24, no. 5, pp. 609-611.
19. Kuo F.F., Freeny S.L. Hilbert transforms and modulation theory. Proc. of the National Electronics Conference. Chicago, 1962, pp. 61-68.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. О. Костіним (Україна); д.т.н, проф. С. І. Випанасенко (Україна)

Надійшла до редколегії 13.12.2012.

Прийнята до друку 21.03.2013.