

Т.М. МІЩЕНКО (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, моб.тел.: (099)136-96-25, ел. пошта [mishchenko\\_tn@ukr.net](mailto:mishchenko_tn@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0001-6336-7350](http://orcid.org/0000-0001-6336-7350)

## ІДЕНТИФІКАЦІЙНА МОДЕЛЬ ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗМІННОГО СТРУМУ

### ВСТУП

Ця робота є продовженням і розвитком досліджень [1,2] по обґрунтуванню ідентифікаційних моделей пристроїв і підсистем систем електричної тяги швидкісного руху поїздів.

Однією із складних задач дослідження шляхом математичного моделювання електромагнітних процесів в системах електричного транспорту, що обслуговують швидкісний рух поїздів, є побудова схем заміщення електрорухомого складу (ЕРС). Це обумовлено складною схемотехнікою навіть одиниці ЕРС [3,4], не говорячи навіть про те, що ця проблема істотно ускладнюється у випадку швидкісного руху, коли на фідерній зоні рухається пакет з 5...7 поїздів. В цьому випадку неможливо побудувати точну класичну модель такої нелінійної динамічної підсистеми як ЕРС на основі законів теоретичної електротехніки. За нашою думкою, розв'язати цю задачу можливо, й тим самим доцільно, методами ідентифікації систем. Така задача вирішена в [1] для ЕРС постійного струму шляхом розв'язання інтегрального рівняння Вінера-Хопфа чи Фредгольма першого роду з ядром типу згортки. В цій роботі знаходиться модель для швидкісного ЕРС.

### Схемотехніка та напруги і струми швидкісного ЕРС

Згідно [5], для забезпечення руху поїздів на залізницях України зі швидкістю до 160 км/год створено і розпочато виробництво електровозів змінного струму типу ДСЗ. Для забезпечення перевезень зі швидкістю до 200км/год передбачається, по-перше, створення двосистемного (3кВ постійної та 25кВ, 50Гц змінної напруг) електровозу типу ЕД4 і, по-друге, глибока модернізація електровозу ДСЗ у електровоз ДСЗМ. Подальше збільшення швидкостей перевезень пасажирів у міжобласному сполученні до 200...220км/год передбачається за рахунок використання двосистемних електропоїздів типу ЕП1 100.

При цьому всі спеціалісти вважають, що для виконання вищезазначеного потрібно щоб тяговий привод перспективних електровозів і електропоїздів для швидкісного і високошвидкісного руху будувався на базі безколекторних тягових двигунів (ТЕД) і найчастіше – на основі асинхронних короткозамкнених ТЕД. При цьому ці ТЕД повинні живитись через певні тягові перетворювачі, зокрема через вхідний випрямляч 4q-s, який суттєво покращує якість вхідної до ЕРС електроенергії, обумовлюючи майже синусоїдний характер вхідних напруги і струму.

### Передатна та імпульсна перехідна функції як моделі ЕРС

Багатьма дослідженнями, зокрема в [6,7], встановлено, що в якості характеристик, тобто ідентифікаційних моделей, лінійних (чи лінеаризованих) динамічних систем можуть виступати передатна функція (ПФ) чи імпульсна перехідна функція (ІПФ). Після заміни в класичному визначенні передатної функції [8] оператора  $j\omega$  на оператор  $p$  передатна функція лінійної (чи лінеаризованої) динамічної системи може бути визначена як відношення прямого перетворення Лапласа  $Y(\bar{p})$  вихідної (з системи) функції (процесу)  $y(t)$  до такого ж перетворення Лапласа  $X(\bar{p})$  вхідної до системи функції (процесу)  $x(t)$  (при нульових початкових умовах). Оскільки в нашій задачі системою є швидкісний ЕРС, вхідним процесом є напруга на струмоприймачі  $u(t)$ , а вихідним процесом – струм  $i(t)$  ЕРС, тоді передатна функція ЕРС являє собою вираз:

$$G(\bar{p}) = \frac{I(\bar{p})}{U(\bar{p})}, \quad (1)$$

де

$$I(\bar{p}) = \int_0^{\infty} i(t) \exp^{-pt} dt; \quad (2)$$

$$U(\bar{p}) = \int_0^{\infty} u(t) \exp^{-pt} dt. \quad (3)$$

Як відомо [8], імпульсна перехідна функція  $g(t)$  являє собою реакцію лінійної (чи лінеаризованої) системи на прикладену в момент часу  $t=0$  дію, яка представляє собою одиничну імпульсну  $\delta$ -функцію. Оскільки ПФ та ІПФ являються перетворенням Лапласу одна до іншої, тоді імпульсна перехідна функція  $g(t)$  може бути знайдена за відомою  $G(\bar{p})$  згідно теорії лишок як [9]:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi j} \oint G(p) \exp^{-pt} dt, \text{ при } t \geq 0 \quad (4)$$

де інтегрування здійснюється по замкнутому контуру, що складається із уявної вісі та напівкола нескінченно великого радіуса, розташованого в лівій напівплощині комплексної площини.

Згідно теорії лишок, значення інтегралу (4) дорівнює сумі лишок підінтегрального виразу у всіх полюсах, що знаходяться усередині контуру, помноженій на  $2\pi j$ .

Для визначення лишок припустимо, що всі полюси прості, тоді дріб (1) можна розкласти на прості за методом невизначених коефіцієнтів так [8]:

$$\begin{aligned} \frac{I(\bar{p})}{U(\bar{p})} &= \frac{A_1}{p-p_1} + \frac{A_2}{p-p_2} + \dots \\ &+ \frac{A_k}{p-p_k} + \dots + \frac{A_n}{p-p_n} = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{p-p_k} \end{aligned} \quad (5)$$

де  $p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_n$  – прості корені (полюси) рівняння  $U(\bar{p})$  виразу (1).

Для визначення коефіцієнтів  $A_k$  помножимо обидві частини рівняння (5) на  $p-p_k$  і візьмемо межу ( $\lim$ ) при  $p \rightarrow p_k$ , тоді отримаємо, що

$$A_k = \frac{I(p_k)}{U'_p(p_k)} \quad (6)$$

Таким чином, згідно з (5) та (6), маємо

$$G(\bar{p}) = \frac{I(\bar{p})}{U(\bar{p})} = \sum_{k=1}^n \frac{I(p_k)}{U'_p(p_k)} \cdot \frac{1}{p-p_k} \quad (7)$$

Підставивши (7) в (4), отримаємо шукану функцію  $g(t)$

$$\begin{aligned} g(t) &= \sum_{k=1}^n \frac{I(p_k)}{U'_p(p_k)} \cdot \frac{1}{2\pi j} \oint \frac{\exp^{pt}}{p-p_k} dp = \\ &= \sum_{k=1}^n \frac{I(p_k)}{U'_p(p_k)} \cdot \exp^{p_k t} \end{aligned}, t \geq 0 \quad (8)$$

### Ідентифікаційна модель швидкісного електровоза ДСЗМ

Як зазначено вище, електровоз ДСЗМ розроблено на основі модернізації існуючого електровоза ДСЗ, тому у подальшому в цій роботі будуть використовуватись деякі параметри і характеристики цього локомотива.

В електровозі ДСЗМ, як і в ДСЗ, в якості вхідного перетворювача використовується чотириохквандрантний випрямляч  $4q-s$ , важливою особливістю якого є можливість забезпечення на струмоприймачі коефіцієнта потужності  $\lambda$ , близького до одиниці [10]. Це підтверджується даними  $\lambda$ , отриманими при тягово-енергетичних випробуваннях електровоза при навантаженні від 25 до 100% потужності тривалого режиму і швидкостях до 160 і далі до 200 км/год:  $\lambda = 0,93 \dots 0,98$ .

Тим самим перетворювач  $4q-s$  обумовлює близькі до синусоїдних вхідні змінні напругу (на струмоприймачі)  $u(t)$  і струму  $i(t)$  електровоза. Про це свідчать результати часового моніторингу цих  $u(t)$  та  $i(t)$  в реальних умовах експлуатації електровоза ДСЗ при різних значеннях струму навантаження  $I$ , рівного 10; 20; 50 та 100А [11, 12]. Результати осцилографування  $u(t)$  та  $i(t)$  показують (рис 1), що, внаслідок того, що тягові підстанції, які живлять фідерні зони із зазначеними електровозами, є достатньо потужними джерелами електроенергії, тому синусоїдна форма вхідної напруги не спотворюється. Причому це спостерігається при різному навантаженні: в межах діючого значення струму від 10 до 100А.

Інша річ, що відбувається з формою тягового електровозного струму: вона помітно спотворюється внаслідок того, що силові кола електровозів містять потужні нелінійні реактивні елементи. Тому у подальшому проаналізуємо гармонійний склад та інші величини лише тягового струму. Це не зовсім відповідає нормам діючого в Україні ГОСТ13109-97, в якому нормуються показники якості електроенергії, виходячи із форми і значень лише напруги, а струму цей стандарт не торкається. Однак міжнародні стандарти якості електроенергії (наприклад, IEEE 519-1992) обмежують не лише

гармонійний склад напруги живлення, але й струму, що споживається. При цьому, згідно з зазначеним стандартом IEEE 519-1992, основним фактором оцінки струму є інтегральний показник гармонійного складу струму  $I_{THD}(\%)$  [13]. Який впливає з таблиці, основний внесок в спотворення кривої струму електровозу роблять непарні гармоніки, особливо 3-тя, амплітуди яких різні для різного електротягового навантаження. Зокрема, струм електровоза містить в основному гармоніки 1, 3, 5, 7 і 9, значення коефіцієнта  $n$ -ї гармоніки  $K_{i(k)}$  яких, визначено згідно з ГОСТ 13109-97 (табл.1).

Значення струму $I$ , А	Коефіцієнт $K_{i(k)}$ гармонік, %				$I_{THD}, \%$
	3	5	7	9	
10,44	57,07	9,0	5,79	2,86	58,9
21,79	26,55	2,79	2,69	1,28	27,2
50,7	14,28	2,02	1,17	0,79	14,2
100,2	4,72	0,31	0,48	0,4	5,0

До цього треба додати, що дещо спотворений при малих навантаженнях (тобто, несинусоїдний) тяговий струм може бути заміщений еквівалентним синусоїдним за методом еквівалентних синусоїд [8]. Отже, можна вважати, що вхідні (до електровозу) напруга  $u(t)$  та струм  $i(t)$  являються синусоїдними функціями з випадковими амплітудами.

Враховуючи зазначене вище, отримуємо вираз імпульсної перехідної функції, як ідентифікаційної моделі електровоза ДСЗМ, для таких, згідно рис.1, значень:  $I = 100$  А,  $U = 28368$  В,  $f = 50$  Гц,  $\psi_u = 15,3^\circ$ ,  $\psi_i = 0^\circ$ . Тобто, згідно теоретичних положень ідентифікації систем, вважаємо, що вхідним процесом для електровоза є напруга  $u(t) = 28368 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t + 15,3) = 4 \cdot 10^4 \cdot \sin(314t + 15,3)$  В, а вихідним – струм  $i(t) = 100 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 314t = 141 \cdot \sin 314t$  А. Зображення за Лапласом цих функцій мають вигляди [8]:

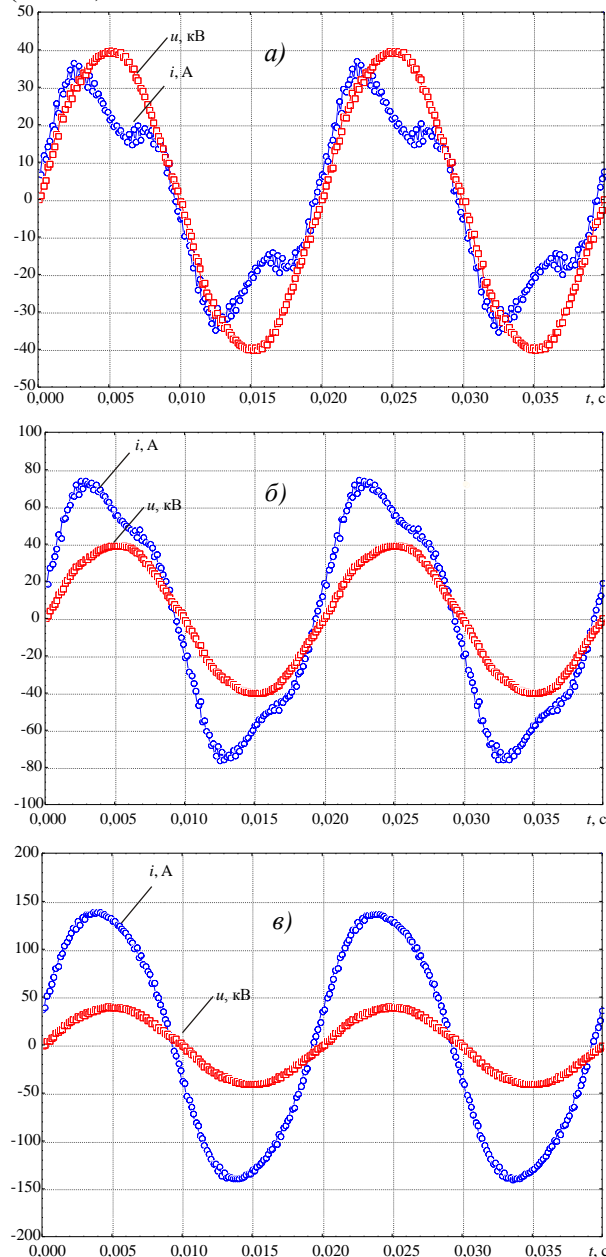


Рис. 1. Осцилограми напруги та струму електровоза ДСЗ при діючому значенні струму навантаження (А): а) 20; б) 50; в) 100

$$L[u(t)] = U \bar{p} = \frac{U_m (p \sin \phi_u + \omega \cos \phi_u)}{p^2 + \omega^2} = \frac{4 \cdot 10^4 (p \sin 15,3 + 314 \cos 15,3)}{p^2 + 314^2} \quad (9)$$

$$L[i(t)] = I(\bar{p}) = \frac{I_m (p \sin 0 + \omega \cos 0)}{p^2 + \omega^2} = \frac{141 \cdot 314}{p^2 + 314^2} \quad (10)$$

Тоді маємо передатну функцію електровоза:

$$G(\bar{p}) = \frac{I(\bar{p})}{U(\bar{p})} = \frac{44274}{10554,9p + 12,1 \cdot 10,6} \quad (11)$$

Вираз шуканої імпульсної перехідної функції  $g(t)$  визначаємо за формулою розкладання (8) і вона має вигляд:

$$g(t) = 4,19e^{-1148 \cdot t} \text{ См} \quad (12)$$

Цей вираз, як модель електровоза, дозволяє визначати струм електровоза в його усталеному чи перехідному режимі роботи при будь-якому імовірнісному значенні напруги на струмоприймачі. Наприклад, визначимо математичне очікування струму  $M_I$  в установленому режимі при номінальній напрузі  $U_{ном} = M_U = 25000\text{В}$ . Здійснимо це за формулою [14]:

$$m_I(t) = \int_0^t g(t \cdot \tau) \cdot M_U \cdot d\tau \quad (13)$$

Підставивши (12) в (13), отримуємо математичне очікування перехідного струму електровозу

$$m_I(t) = \int_0^t 25000 \cdot 4,19 \cdot e^{-1148 \cdot (t \cdot \tau)} = \quad (14)$$

$$= 91,25 - 91,25e^{-1148 \cdot t} \text{ А}$$

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міщенко, Т.М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв систем електричної тяги. Метод вагової функції/ Т.М. Міщенко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2014, № 5 (53). – С. 74-82.
2. Міщенко, Т.М. Метод ідентифікації параметрів пристроїв системи електротяги при проектуванні швидкісного руху поїздів / Т.М. Міщенко // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції Електрифікація залізничного транспорту ТРАНСЕЛЕКТРО-2015. – 2015. – С. 47-48.
3. Хворост, Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития. / Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Электротехника і Електромеханіка. – 2003. – №4. – С.104-114.
4. Міщенко, Т.М. Перспективи схематичних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів/ Т.М. Міщенко // Науковий журнал Електротехніка та Електроенергетика, Запорізький національний технічний університет 2014. – № 1. – С. 19-28.
5. Лашко, А.Д. Технічні вимоги до тягового рухомого складу нового покоління. / А.Д. Лашко, С.Г. Грищенко // Залізничний транспорт України. – 2008. – №3. – С.11-14.
6. Eijkhoff P., Trends and Progress in System Identification. / Pergamon Press. Oxford., 1981-400 p.
7. Ljung L. System Identification. Sweden/ By Prentice-Hall. , 1987 – 432 p.
8. Костін, М.О. Теоретичні основи електротех-

#### Висновки

1. Складність схематичних рішень перспективного, особливо швидкісного, електроухомого складу (ЕРС), обумовлює необхідність розробки нових методів математичного моделювання електромагнітних і електроенергетичних процесів в системах електричної тяги.
2. Імпульсна перехідна функція будь-якого типу ЕРС являється вичерпною його характеристикою і тому може слугувати в повній мірі ідентифікаційною моделлю цього типу ЕРС.
3. Враховуючи тісну функціональну взаємозв'язаність імпульсної перехідної і передатної функцій, існує практична можливість визначати першу функцію через другу.
4. Швидкісні типи ЕРС, маючи, як правило, на вході перетворювачі типу  $4q-s$  й тим самим забезпечуючи вхідні напругу і струм синусоїдними, дозволяють отримати передатні функції в якості їх ідентифікаційних моделей.

#### REFERENCES

1. Mishchenko, T.M. Teoretichni aspekty ta metody identyfikatsiyi parametriv prystroyiv system elektrychnoyi tyahy. Metod vahovoyi funktsiyi/ T.M. Mishchenko // Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu, 2014, # 5 (53). – S. 74-82.
2. Mishchenko, T.M. Metod identyfikatsiyi parametriv prystroyiv systemy elektrotyahy pry proektuvanni shvydkisnoho rukhu poyizdiv / T.M. Mishchenko // Materyaly VIII Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyyi Elektrifykatsyya zaliznychnoho transportu TRANS-ELEKTRO-2015. – 2015. – S. 47-48.
3. Khvorost, N.V. Elektricheskiye zheleznyye dorohy: etapy y perspektivy razvytyya. / N.V. Khvorost, N.V. Panasenka // Elektrotekhnik a i Elektromekhanika. – 2003. – #4. – S.104-114
4. Mishchenko, T.M. Perspektivy skhemotekhnichnykh rishen' i modelyuvannya pidsystem elektrychnoyi tyahy pry vysokoshvydkisnomu rusi poyizdiv/ T.M. Mishchenko// Naukovyy zhurnal Elektrotekhnik a ta Elektroenerhetyka, Zaporiz'kyy natsional'nyy tekhnichnyy universytet 2014. – # 1. – S. 19-28.
5. Lashko, A.D. Tekhnichni vymohy do tyahovoho rukhomoho skladu novoho pokolinnya. / A.D. Lashko, S.H. Hryshchenko // Zaliznychnyy transport Ukrayiny. – 2008. – #3. – S.11-14.
6. Eijkhoff P., Trends and Progress in System Identification. / Pergamon Press. Oxford., 1981-400 p.
7. Ljung L. System Identification. Sweden/ By Prentice-Hall. , 1987 – 432 p.

ніки. / М.О. Костін, О.Г. Шейкіна// Дніпропетровськ, ДНУЗТ, -2006, т.1. – 336 с.; -2007, т.2. – 276 с.

9. Kozn G. Mathematical: Hadbook for scientists and Engineers / T. Kozn: Mgraw Hill Book Company. London,1961.-720p.

10. Гетьман Г.К., Теория электрической тяги.- Днепропетровск: изд-во «Маковецкий», 2011. – 456с.

11. Міщенко,Т.М. Гармонійний аналіз первинних напруги та струму нових типів електровозів змінного струму. / Т.М. Міщенко, А.А. Босий// Гірничі електромеханіка та автоматика: Наук. – техн.зб. – 2012. – Вп. 89 – С. 16-20.

12. Міщенко, Т.М. Геометричне трактування реактивної потужності та його зв'язок зі спектральним складом тягових напруги та струму швидкісних електровозів. / Т.М. Міщенко//Науковий журнал Електротехніка та Електроенергетика, Запорізький національний технічний університет 2015. – № 2. – С. 81-86.

13. Разанов, Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергетики (аналитический обзор) / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчинский// Электротехника. –1998. –№3. С.10-17.

14. Лившиц, Н.А. Вероятностный анализ систем автоматического управления // Н.А. Лившиц, В.Н. Пугачев // –М.: Советское радио, 1963. –896с

8. Kostin, M.O. Teoretychni osnovy elektrotekhniky. / M.O. Kostin, O.H. Sheykina/ /Dnipropetrovs'k, DNUZT, -2006, t.1. – 336 s.; -2007, t.2. – 276 s.

9. Kozn G. Mathematical: Hadbook for scientists and Engineers / T. Kozn: Mgraw Hill Book Company. London,1961.-720p.

10. Het'man H.K., Teoryya elektrycheskoy tyahy.- Dnepropetrovsk: yzd-vo «Makovetsky», 2011. – 456s

11. Mishchenko, T.M. Harmoniynyy analiz pervynnykh napruhy ta strumu novykh typiv elektrovoziv zminnoho strumu. / T.M. Mishchenko, A.A. Bosyy// Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka: Nauk. – tekhn.zb. – 2012. – Vp. 89 – S. 16-20.

12. Mishchenko, T.M. Neometrychne traktuvannya reaktivnoyi potuzhnosti ta yoho zv'yazok zi spektral'nym skladom tyahovykh napruhy ta strumu shvydkisnykh elektrovoziv. / T.M. Mishchenko//Naukovyy zhurnal Elektrotekhnika ta Elektroenerhetyka, Zaporiz'kyy natsional'nyy tekhnichnyy universytet 2015. – # 2. – S. 81-86.

13. Razanov, Yu.K. Sovremennyye metody uluchsheniya kachstva elektroenerhyi (analytycheskyy obzor) / Yu.K. Rozanov, M.V. Ryabchynskyy// Электротехника. –1998. –#3. С.10-17.

14. Lyvshyts, N.A. Veroyatnostnyy analiz sistem avtomaticheskoho upravleniia // N.A. Lyvshyts, V.N. Puhachev // –M.: Sovet'skoe radyo, 1963. –896s.

Надійшла до друку 07.12.2016.

Внутрішній рецензент *Костін М.О.*

Зовнішній рецензент *Хворост М.В.*

Розробка і чисельні розрахунки ідентифікаційної моделі швидкісного електрорухомого складу (ЕРС) змінного струму. Використано методики і прилади часової реєстрації випадкових процесів тягових напруг і струмів електровозу змінного струму на діючих ділянках, методи оцінки якості електроенергії згідно ГОСТ 13109-97, методи операційного числення, теорія лишків і випадкових процесів, а також способи імовірно-статистичної обробки і реєстограм. Здійснено оцінку гармонійного складу тягових напруг і струмів швидкісного електровозу ДСЗМ, що дало можливість побудувати і використати передатну функцію як його ідентифікаційну модель. Показано, що імпульсна перехідна функція знаходиться як зворотне перетворення Лапласа передатної функції. Виконано чисельні розрахунки математичного очікування тягового струму електровоза ДСЗМ у перехідному режимі. Показано, що швидкісні типи ЕРС, які мають на виході перетворювачі типу  $4q-s$ , забезпечуються вхідними гармонійними напругою і (в першому наближенні) струмом. Одержано аналітичний вираз імпульсної перехідної функції через зворотне перетворення Лапласа передатної функції. Запропоновано в якості ідентифікаційної моделі ЕРС використовувати імпульсну перехідну функцію. Отримано аналітичну закономірність зміни математичного очікування тягового струму швидкісного електровозу.

Проведений гармонічний аналіз тягових напруг і струмів швидкісних ЕРС з перетворювачами  $4q-s$  дає можливість при побудові ідентифікаційних моделей використовувати метод передатних функцій. Отримане аналітичне співвідношення імпульсної перехідної функції дозволяє використовувати її як ідентифікаційну модель для аналізу електромагнітного процесу в швидкісних ЕРС в перехідному режимі. Виконані чисельні розрахунки дозволяють встановити закономірності тісної функціональної взаємопов'язаності імпульсної перехідної і передатної функцій для кожного типу швидкісного ЕРС.

**Ключові слова:** швидкісний електрорухомий склад; якість електричної енергії; перетворювач  $4q-s$ .

УДК 621.335.04:621.333

Т.Н. МИЩЕНКО (ДНУЖТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, моб.тел.: (099)136-96-25, ел. пошта [mishchenko\\_tn@ukr.net](mailto:mishchenko_tn@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0001-6336-7350](http://orcid.org/0000-0001-6336-7350)

## ИДЕНТИФИКАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Разработка и численные расчеты идентификационной модели скоростного электроподвижного состава (ЭПС) переменного тока. Методика. Используются методики и приборы временной регистрации случайных процессов тяговых напряжений и токов электровоза переменного тока на действующих участках, методы оценки качества электроэнергии согласно ГОСТ 13109-97, методы операционного исчисления, теория вычетов и случайных процессов, а также способы вероятностно-статистической обработки осциллограмм и регистрограмм. Осуществлена оценка гармонического состава тяговых напряжений и токов скоростного электровоза ДСЗМ, что позволило построить и использовать передаточную функцию как его идентификационную модель. Показано, что импульсная переходная функция находится как обратное преобразование Лапласа передаточной функции. Выполнены численные расчеты математического ожидания тягового тока электровоза ДСЗМ в переходном режиме. Показано, что скоростные типы ЭПС, которые имеют на выходе преобразователи типа 4q-s, обеспечиваются входящими гармоническими напряжением и (в первом приближении) током. Получено аналитическое выражение импульсной переходной функции через обратное преобразование Лапласа передаточной функции. Предложено в качестве идентификационной модели ЭПС использовать импульсную переходную функцию. Получена аналитическая закономерность изменения математического ожидания тягового тока скоростного электровоза. Проведенный гармонический анализ тяговых напряжений и токов скоростных ЭПС преобразователями 4q-s дает возможность при построении идентификационных моделей использовать метод передаточных функций. Полученное аналитическое соотношение импульсной переходной функции позволяет использовать ее как идентификационную модель для анализа электромагнитных процессов в скоростных ЭПС в переходном режиме. Выполнены численные расчеты позволяют установить закономерности тесной функциональной взаимосвязанности импульсной переходной и передаточной функции для каждого типа скоростного ЭПС.

**Ключевые слова:** скоростной электроподвижной состав; качество электрической энергии; преобразователь 4q-s.

Внутренний рецензент *Костин Н.А.*

Внешний рецензент *Хворост Н.В.*

UDC 621.335.04:621.333

T.M. MISHCHENKO (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan Street, 2 Dnepr, Ukraine, 49010, tel.: (099)136-96-25, e-mail: [mishchenko\\_tn@ukr.net](mailto:mishchenko_tn@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0001-6336-7350](http://orcid.org/0000-0001-6336-7350)

## IDENTIFICATION MODEL SPEED ELECTRIC ROLLING STOCK AC

Design and numerical calculations of the identification model of high-speed electric rolling stock (EPS) AC. Methods. The procedure and equipment time registration of random processes traction voltages and electric currents on AC operating areas, methods of power quality assessment in accordance with GOST 13109-97, methods of operational calculus, the theory of random processes and deductions, as well as methods of probabilistic and statistical obrabotkiostsilogramm and corded . The estimation of the harmonic content of the traction voltage and current high-speed electric DS3M that allowed to build and use a transfer function model as his identity. It is shown that the impulse response function is as the inverse Laplace transform of the transfer function. Numerical calculations matematcheskogotiiya electric traction current DS3M in transition mode. It is shown that high-speed types of EPS, which have output the adjustable type pre-4q-s, members are provided, and the harmonic voltage (in first approximation) current. An analytical expression of the impulse response function by the inverse Laplace transform of the transfer function. It is proposed as an identification model EPS to use the impulse response function. The analytical pattern of change of the expectation of a high-speed electric traction current. Held fast Fourier analysis of EPS converters 4q-s traction voltage and current allows the construction of models of identification to use the method of transfer functions. The resulting analytical relation impulse response function allows you to use it as an identification model for the analysis of electromagnetic processes in high-speed EPS in transition mode. Numerical calculations allow us to establish patterns of close functional interrelatedness of the impulse response and transfer function for each type of high-speed EPS.

**Keywords:** high-speed electric rolling stock; quality of electrical energy; converter 4q-s.

Internal reviewer *Kostin M.O.*

External reviewer *Khvorost M.V.*