

УДК 621.391:681.518

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИХІДНОГО СТРУМУ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ СИСТЕМИ АЛСН

Кандидати техн. наук О. М. Прогонний, О. Є. Зінченко,  
студенти Д. В. Сапова, В. В. Волошин, Ж. А. Болдырева

## АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО ТОКА КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ АЛСН

Кандидаты техн. наук А. Н. Прогонный, Е. Е. Зинченко,  
студенты Д. В. Сапова, В. В. Волошин, Ж. А. Болдырева

## A MATHEMATICAL MODELING OF A CAB SIGNALING SYSTEM OUTPUT CURRENT: A MODERN STATE ANALYSIS

Cand. of tehn. sciences A. Progonniy, E. Zinchenko,  
students D. Sapova, V. Voloshin, Zh. Boldyreva

*Розглянуто існуючі математичні моделі часової залежності струму рухомого шунта, накладеного на рейкову лінію в системі автоматичної локомотивної сигналізації неперервного типу. Моделі класифіковано за підходами, використаними при описанні рейкового кола. Визначено явні та неявні математичні та фізичні припущення, прийняті при побудові цих моделей. Подано оцінку ступеню прийнятності кожної з моделей з точки зору інженерної практики.*

**Ключові слова:** рейкове коло, струм шунта, математична модель, частотний підхід, часовий підхід.

*Рассмотрены существующие математические модели временной зависимости тока движущегося шунта, наложенного на рельсовую линию в системе автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа. Модели классифицированы по подходам, использованным при описании рельсовой цепи. Определены явные и неявные математические и физические допущения, принятые при построении этих моделей. Дана оценка степени приемлемости каждой из моделей с точки зрения инженерной практики.*

**Ключевые слова:** рельсовая цепь, ток шунта, математическая модель, частотный подход, временной подход.

*Existing mathematical models of a time-domain dependency of a moving shunt current in a cab signaling system are considered. These models are classified on the base of approaches used for a rail circuit description. An explicit and non-explicit assumptions made during the models building are revealed. A degree of acceptability for every model is evaluated from the engineering point of view.*

**Keywords:** rail circuit, shunt current, mathematical model, frequency-domain approach, time-domain approach.

**Вступ.** Системи автоматичної типу (АЛСН) є важливою складовою локомотивної сигналізації неперервного підтримки безпечного руху поїздів. При

цьому пропускна спроможність і достовірність передачі повідомлень в існуючих системах АЛСН є недостатньо високими [1]. Тому є актуальною задача вдосконалення цих систем.

**Аналіз новітніх досліджень та публікацій.** Вихідний струм каналу передачі сигналу системи АЛСН утворений як сигнальними, так і заводовими компонентами. Робота [1] висвітлює загальну структуру даного струму та містить опис основних завод. У роботах [2, 3] розглянуто спотворення сигналу, обумовлені магнітними властивостями рейок, а в роботі [4] розглянуто вплив на сигнал феромагнітних неоднорідностей рейкової колії. Перелічені роботи дають загальну картину співвідношення між сигнальними та заводовими компонентами вихідного струму каналу передачі сигналів АЛСН, однак містять результати переважно експериментального характеру і здебільшого щодо розгляду завод. Набагато більшу увагу сигнальній компоненті та формалізації її описання приділено в роботах [5-8], в яких, власне, й продемонстровано різні підходи до побудови математичної моделі вказаного струму і, зокрема, враховано рух шунта. Нарешті, найбільш загальні підходи до моделювання струмових відгуків лінійних і нелінійних кіл на імпульсні вхідні впливи (базовані на розв'язку систем диференціальних рівнянь або рядах Фур'є) розглянуто в роботах [9-11].

**Об'єкт, мета і задачі дослідження.** Об'єктом дослідження даної роботи виступає процес формування вихідного струму каналу передачі сигналів системи АЛСН.

Метою роботи є порівняльний аналіз існуючих математичних моделей, які побудовані при вивченні часової залежності струму шунта, що замикає рейкове коло, водночас поступально рухаючись вздовж нього, і з'ясування умов існування та величин розбіжностей між ними.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1) чітко розділити моделі за підходами, використаними при описанні рейкового кола;

2) визначити явні та неявні математичні та фізичні припущення, прийняті при побудові вказаних моделей;

3) дати оцінку ступеню прийнятності кожної з моделей з точки зору інженерної практики.

**Основна частина.** *Результати досліджень при застосуванні частотного підходу.* В роботі [6] для віднаходження часової залежності струму шунта для ділянки рейкового кола побудовано комплексну передатну функцію (КПФ) за струмом:

$$\underline{K}_I(\omega) = \frac{1}{(\underline{C}R_{ш} + \underline{D})\underline{Z}_Г + \underline{A}R_{ш} + \underline{B}}, \quad (1)$$

де  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  є А-параметрами ділянки;  $R_{ш}$  – опір шунта;  $\underline{Z}_Г$  – внутрішній опір генератора сигналу.

Надалі авторами роботи [6] показано, що за підстановки первинних параметрів електричної лінії, опорів генератора, навантаження та шунта цей вираз можна подати у такій загальній формі:

$$\underline{K}_I(\omega) = \frac{1}{-a\omega^2 + jb\omega + c}, \quad (2)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти, що залежать від параметрів кола та від координати шунта;  $j$  – уявна одиниця.

На базі цього подання отриманий проміжний вираз для спектральної щільності струму шунта за умови, що від часу залежить лише координата його розташування вздовж рейкової лінії. Для отримання кінцевого виразу необхідно було виконати пряме перетворення Фур'є від добутку (2) із спектром прямокутного радіоімпульсу. Неможливість точного інтегрування примусила авторів роботи [6] застосувати апроксимації виразів, що

стоять під знаками інтегралів. Але отриманий ними струм шунта як функція часу все одно стався дуже громіздким і, виходячи з цього, мало корисним для інженерного застосування.

У роботі [5] авторами було враховано слабкість залежності від квадрата частоти в КПФ за струмом вираз (2) і внаслідок цього отримано такий вираз для неї:

$$K_I(\omega) = \frac{1}{j\omega b + c} \quad (3)$$

Викладена для попереднього випадку методика визначення виразу для струму

$$\begin{aligned} e_r(t) &= 1(t)E_{Im} \sin(\omega_0 t + \varphi_E) - 1(t - \tau_H)E_{Im} \sin(\omega_0 t + \varphi_E) = \\ &= e_1(t) - e_2(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Тут  $1(t)$  є позначенням одиничної ступінчастої функції;  $E_{Im}$ ,  $\omega_0$  та  $\varphi_E$  – відповідно амплітуда, частота і початкова фаза сигнального імпульсу.

Знайшовши спектральну щільність кожного з доданків виразу (4), автори

$$i_{ш}(t) = \frac{E_{Im}}{\sqrt{c^2 + (\omega_0 b)^2}} \Lambda_1(t) \cdot 1(t) - \frac{E_{Im}}{\sqrt{c^2 + (\omega_0 b)^2}} \Lambda_2(t) \cdot 1(t - \tau_H), \quad (5)$$

де  $\Lambda_1(t)$  та  $\Lambda_2(t)$  - деякі допоміжні функції.

Як у роботі [5], так і в роботі [6] автори спиралися на припущення про повільність зміни в часі параметрів комплексної передатної функції за струмом. Такий самий підхід застосований і авторами роботи [7], де подані графіки зміни модуля цієї функції в часі на кількох частотах. Внаслідок цього отримані ними формули для струму шунта як функції часу можна застосовувати лише при повільному русі поїздів, що скоріше є придатним для аналізу систем АЛСН при руху на станціях.

*Результати досліджень при застосуванні часового підходу.* Інший

шунта в цій ситуації теж виявилася непридатною з тих самих причин. Однак автори роботи [5] на підставі аналізу виразу (3) і з урахуванням руху шунта дійшли висновку, що за даних спрощуючих припущень розрахунок залежності  $i_{ш}(t)$  – це розрахунок струму, викликаного подачею прямокутного радіоімпульсу протяжністю  $\tau_H$  сигнальної електрорушійної сили (ЕРС)  $e_r(t)$  на послідовне  $RL$ -коло із змінними  $R(t)$  та  $L(t)$ . Цей радіоімпульс можна зобразити як різницю двох функцій:

роботи [5] після цього віднайшли струм шунта за допомогою зворотного перетворення Фур'є. Це призвело до отримання математичного виразу для струму шунта в більш наочній формі, ніж у попередньому випадку:

підхід до отримання математичного виразу, що описує струм шунта, був використаний автором роботи [8]. Він застосував тлумачення КПФ (3) як такої, що описує коло, утворене в результаті послідовного з'єднання резистора та котушки індуктивності, параметри  $R_{II}$  та  $L_{II}$  яких змінюються в часі внаслідок руху шунта. В цій роботі розраховано наслідки підключення синусоїдальної ЕРС до такого кола. Автор спочатку прийняв до уваги, що розглянуте коло є параметричним, і в ньому первинною величиною в парі з резистором є не індуктивність, а її потокозчеплення  $\Psi(t)$ . Після визначення цього виписано диференціальне рівняння кола у вигляді

$$\frac{d\Psi(t)}{dt} + i(t)R_{II}(t) = E_{IIm} \sin(\omega_0 t + \varphi_E) . \quad (6)$$

Оскільки  $\Psi(t) = L_{II}(t) i(t)$ , то рівняння (6) набуває такого остаточного вигляду:

$$L_{II}(t) \frac{di(t)}{dt} + \left[ \frac{dL_{II}(t)}{dt} + R_{II}(t) \right] i(t) = E_{IIm} \sin(\omega_0 t + \varphi_E) . \quad (7)$$

Припущення про постійну швидкість  $V$  руху шунта призводить до таких часових залежностей індуктивності та опору розрахованого кола:

$$L_{II}(t) = L_a - k_L \cdot V \cdot t, \\ R_{II}(t) = R_a - k_R \cdot V \cdot t,$$

де  $L_a$  та  $R_a$  – початкові величини параметрів у перерізі рейкової лінії, де шунт розташований у момент подачі сигнального імпульсу в лінію;  $k_L$  та  $k_R$  – коефіцієнти пропорційності.

В ході аналітичного розв’язання рівняння (7) автор роботи [8] зіткнувся з

необхідністю узяття інтеграла  $\int_0^t \sin(\omega_0 t - \varphi_E) \cdot (L_a - k_L V t)^{\beta-1} \cdot e^{\alpha t} dt$  і вимушений був скористатися наближеною рівністю

$$(1-x)^y \approx 1 - x y . \quad (8)$$

Це еквівалентно припущенню, що  $\frac{k_L V t}{L_a} \ll 1$ . Тому наведений ним як результат роботи вираз для шуканого струму

$$i(t) = \frac{E_m}{\left(1 - \frac{k_L V}{L_a} t\right)^\beta \cdot \sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} \cdot L_a} \cdot \left[ \sin(\omega_0 t + \varphi_E + \psi) - e^{-\alpha t} \cdot \sin(\varphi_E + \psi) \right] - \\ - \frac{E_m k_L V \cdot (\beta - 1)}{\left(1 - \frac{k_L V}{L_a} t\right)^\beta L_a^2} \cdot \left[ \frac{t}{\sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2}} \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_E + \psi) - \frac{1}{\omega_0^2 + \alpha^2} \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_E + 2\psi) + \frac{e^{-\alpha t}}{\omega_0^2 + \alpha^2} \cdot \sin(\varphi_E + 2\psi) \right] \quad (9)$$

є наближеним і відтворює з прийнятною точністю, як вказує автор, лише ділянку кривої струму в районі переднього фронту імпульсу.

Числове розв’язання рівняння для струму шунта. Для з’ясування ступеня практичної придатності поданих вище формул для часової залежності струму шунта мінімально необхідним є порівняння цих результатів із заздалегідь точними

результатами, отриманими хоча б для кількох конкретних сполучень параметрів піддослідного електричного кола. Як такі результати візьмемо результати числового розв’язання диференціального рівняння (7), маючи при цьому на увазі, що їх точність визначена точністю використаного методу розв’язання диференціальних рівнянь. Саме такі методи покладені в основу існуючих математичних середовищ. У ході

проведення цієї роботи було виконано розрахунок за формулою (9) при сполученнях параметрів рейкового кола, за яких наближена рівність (8) виконується з похибкою не більше 20%. Далі було обчислено абсолютну величину різниці між результатами (9) та розв'язком, обчисленим числовим розрахунком та прийнятим за точний. На рис. 1-6 наведені графіки часових залежностей точних та наближених згідно з виразом (9) значень струму, а також графіки абсолютних різниць між наближеними та точними значеннями. Можна зробити висновок, що прийнятна точність апроксимації зберігається в межах (0...0,002) с. За протяжності сигнального

імпульсу системи АЛСН близько 0,3 с цей проміжок відповідає часовій зоні коло фронту імпульсу. Далі точність апроксимації швидко погіршується вздовж імпульсу. Ці результати кількісно підтверджують зроблений у роботі [8] висновок про обмеження часової ділянки апроксимації і водночас настановлюють на думку, чи не занадто короткою є ця ділянка. Однак за браку інших аналітичних описань часової залежності сигнального струму системи АЛСН вираз для струму, отриманий в роботі [8], можна використовувати при розрахунках з урахуванням відповідних обмежень.

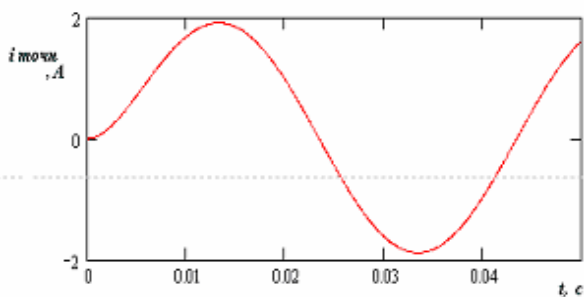


Рис. 1. Точний струм при  $\varphi_E = 0^\circ$

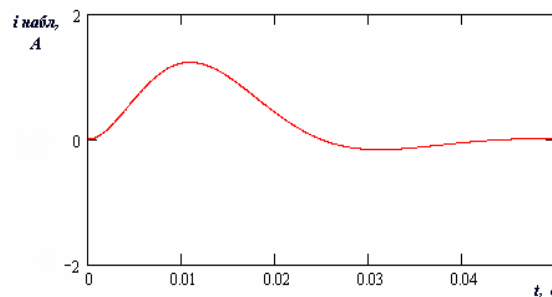


Рис. 2. Струм згідно з виразом (9) при  $\varphi_E = 0^\circ$

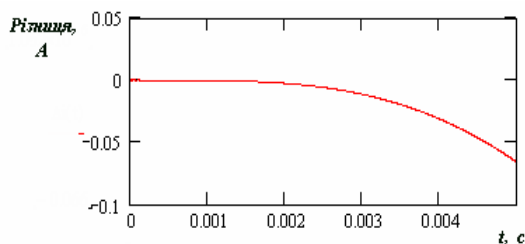


Рис. 3. Абсолютна похибка розрахунку при  $\varphi_E = 0^\circ$

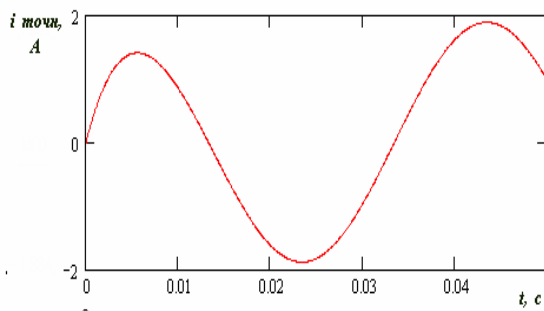


Рис. 4. Точний струм при  $\varphi_E = 90^\circ$

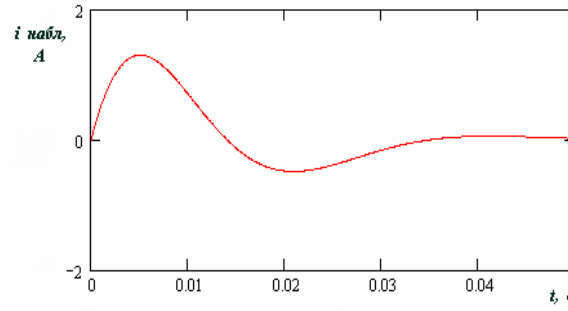
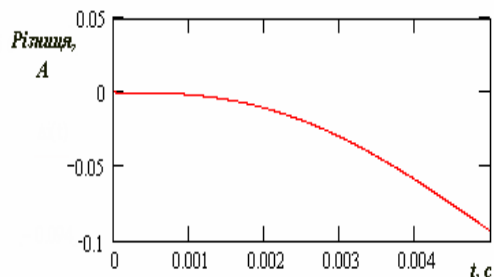


Рис. 5. Струм згідно з виразом (9) при  $\varphi_E = 90^\circ$

Рис. 6. Абсолютна похибка розрахунку при  $\varphi_E = 90^\circ$ 

**Висновки.** Порівняння існуючих методів математичного моделювання сигнального струму системи АЛСН за умови руху шунтувальної перемички показало, що деякі з них придатні лише за низьких швидкостей руху поїзда, а метод, розроблений у роботі [8] хронологічно останнім, придатний у широкому діапазоні швидкостей руху поїзда, але лише при

описанні початкового фрагмента імпульсу. Однак, на відміну від попередніх методів, він має резерв для розширення меж свого застосування. Цим резервом є використання більш точних апроксимацій замість виразу (8), наприклад, розвиненням лівої частини цього виразу в ряд із більшою кількістю членів.

#### Список використаних джерел

1. Бабаєв, М. М. Аналіз існуючих вітчизняних і закордонних систем АЛС на залізничному транспорті [Текст] / М. М. Бабаєв, В. О. Сотник // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 116. – С. 120-127.
2. Augutis, V. Measurements and Processing of Signals used in a Cab Signaling System [Text] / V. Augutis, D. Gailius, R. Misevicius, M. Juraska // Electronics and Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 18. – № 9. – P. 27-30.
3. Леушин, В. Б. Аналіз причин сбоев в системі АЛСН [Текст] / В. Б. Леушин, К. Э. Блачев, Р. Р. Юсупов // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 4. – С. 20-25.
4. Ананьєва, О. М. Вплив неоднорідностей рейкової лінії на приймання сигналів АЛСН [Текст] / О. М. Ананьєва, В. О. Сотник // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 124. – С. 77-83.
5. Ананьєва, О. М. Математична модель вхідного сигнального струму локомотивного приймача числових кодів АЛСН [Текст] / О. М. Ананьєва, В. О. Сотник, Ю. В. Соколов // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – Вип. 26. – С. 67-70.
6. Часові характеристики струму шунта та електрорушійної сили локомотивних котушок системи АЛСН [Текст] / О. М. Ананьєва, М. Г. Давиденко, В. О. Сотник, М. М. Бабаєв // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 127. – С. 56-78.
7. Ананьєва, О. М. Временные зависимости сигнального тока локомотивного приемника числовых кодів АЛСН [Текст] / О. М. Ананьєва, М. Г. Давиденко // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 154. – С. 127-136.
8. Блиндюк, В. С. Дослідження структури вихідного струму каналу передачі сигналів системи АЛСН [Текст] / В. С. Блиндюк // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – №5/1 (25). – С. 47-50.

9. Maffezzoni, P. Time-Domain Simulation of Nonlinear Circuits Through Implicit Runge-Kutta Methods [Text]/ P.Maffezzoni, L.Codecasa, D.D'Amore// IEEE Transactions on Circuits and Systems I. – 2007. – V.54. - №2. – P.391-400.

10. McSharry, P.E. A Dynamical Model for Generating Synthetic Electrocardiogram Signals [Text] / P.E. McSharry, G.D. Clifford, L. Tarassenko, L.A. Smith // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2003. – V.50. - №3. – P.289-294.

11. Chen, G. An RLC Interconnect Model Based on Fourier Analysis [Text] / G. Chen, E.G.Friedman // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2005. – V.24. - №2. – P.170-183.

Рецензент д-р техн наук, професор М.М. Бабаєв

---

Прогонний Олексій Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри електротехніки та електричних машин, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-08. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Зінченко Олена Євгенівна, канд. техн. наук, доцент кафедри електротехніки та електричних машин, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-96. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Сапова Дарина Вікторівна, студентка Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (066)503-27-41. E-mail: missis.sapova2012@mail.ru.

Волошин Владислав Вікторович, студент Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (095)560-39-76. E-mail: animacompany1@gmail.com.

Болдырева Жанна Анатоліївна, студентка Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (098)863-25-07. E-mail: nevdovina.z@mail.ru.

Progonniy Alexey, cand. of tehn. Sciences, Associate Professor, chair of Electronics, Electrical Machines of Ukrainian State University of railway transport. Tel.: (057) 730-10-08. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Zinchenko Elena, cand. of tehn. Sciences, chair of Electronics, Electrical Machines of Ukrainian State University of railway transport. Tel.: (057) 730-19-96. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Sapova Darina, student, Ukrainian State University of railway transport. Tel.: (066)503-27-41. E-mail: missis.sapova2012@mail.ru.

Voloshin Vladislav, student, Ukrainian State University of railway transport. Tel.: (095)560-39-76. E-mail: animacompany1@gmail.com.

Boldyreva Zhanna, student, Ukrainian State University of railway transport. Tel.: (098)863-25-07. E-mail: nevdovina.z@mail.ru.

Стаття прийнята 27.04.2016 р.