

БУРЯК С. Ю. – аспірант (ДНУЗТ)

МАЛОВІЧКО В. В. – к.т.н., ст. викладач (ДНУЗТ)

РИБАЛКА Р. В. – к.т.н., ст. викладач (ДНУЗТ)

ПРЕДСТАВЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СТРІЛОЧНОГО ДВИГУНА ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ В ПРОСТОРИ СТАНІВ

Статтю представив д.ф.-м.н., проф. Гаврилюк В. І.

Вступ

В сучасних умовах постійного підвищення швидкості руху поїздів на залізничному транспорті, все гостріше постає питання надійності експлуатування існуючих засобів забезпечення руху поїздів. В зв'язку з тим, що існуючі системи інтервального регулювання на перегоні та системи станційної автоматики експлуатуються вже досить давно, спостерігається збільшення кількості відмов та пов'язаних з цим затримок потягів за рахунок старіння елементної бази систем залізничної автоматики. Також необхідно враховувати, що системи станційної автоматики, які зараз експлуатуються, розроблялись досить давно, і функції додаткового контролю стану апаратури системи та контролю стану колійних пристроїв в системах електричної централізації (ЕЦ) реалізовані в незначній мірі. Тому розробка систем діагностування та контролю пристроїв залізничної автоматики є важливою та актуальною задачею. Але при створенні системи контролю стрілочних переводів, для перевірки правильності її функціонування, необхідно спочатку відтворити майбутню систему в математичній моделі та перевірити її роботу в різних режимах. З урахуванням цього, створення математичних моделей тих пристроїв залізничної автоматики, які потребують додаткового контролю є невирішеною задачею. Особливе значення вона набуває при створенні систем контролю та діагностування колійних пристроїв станційної автоматики, на які припадає більшість відмов ЕЦ.

Мета та задачі роботи

Одним з колійних пристроїв ЕЦ, який потребує додаткового контролю є стрілоч-

ний привід. При розробці системи контролю та діагностування стрілок [1], з використанням в якості параметру контролю часової залежності струму, який протікає через стрілочний двигун під час переводу стрілки, потрібно діагностичні ознаки, що суб'єктивно визначені з експериментальних даних, обґрунтувати теоретично. В зв'язку з цим, метою даної роботи є розробка математичної моделі стрілочного двигуна послідовного збудження з представленням її в найбільш зручній формі для застосування.

Аналіз проблеми та розробка методу

Для забезпечення надійної роботи систем регулювання рухом поїздів нормативними документами передбачено проведення періодичного технічного обслуговування, що включає контроль основних параметрів апаратури та її регулювання як безпосередньо під час експлуатації, так і в ремонтно-технологічній дільниці дистанції сигналізації та зв'язку. Недоліками існуючої технології обслуговування стрілочних переводів є: значні затрати часу та ручної праці; неможливість проведення безперервного контролю і своєчасного виявлення можливих дефектів та пошкоджень; відсутність можливості виявлення деяких прихованих дефектів електромеханічної системи стрілочних електроприводів, оскільки контроль базується, головним чином, на вимірюванні робочого струму і струму роботи стрілки на фрикцію; необхідність проведення додаткового обстеження в ремонтно-технологічній дільниці для визначення характеру і локалізації дефекту; суб'єктивність отриманих результатів та їх недостатня точність, пов'язана з візуальною реєстрацією. Розробка систем автоматичного контролю та діагностування

стрілочних переводів по кривій часової залежності струму ведеться [1,2], але поки що широкого впровадження такі системи діагностування на залізничному транспорті не набули. Щоб описати роботу привода і мати змогу прогнозувати відмови, потрібно створити математичну модель.

Для дослідження статичних і динамічних режимів роботи стрілочних переводів, на яких встановлено електроприводи з електричними машинами постійного струму (МПС), необхідно скласти математичну модель у формі системи диференціальних рівнянь. Опис об'єкта у вигляді системи диференціальних рівнянь є загальним в смислі можливості одержання рівнянь для статичних режимів, шляхом прирівнювання похідних функцій до нуля. При розробці математичної моделі для стрілочного двигуна необхідно враховувати специфіку його роботи та необхідність отримувати залежності всіх складових моделі відносно струму переводу стрілки.

Результати

Якщо користуватись відомими залежностями [3] між електричними та механічними характеристиками для стрілочних двигунів постійного струму з послідовним збудженням, то двигун можна описати наступною системою диференціальних і алгебраїчних рівнянь в абсолютних одиницях:

$$\begin{cases} U = E + R_{\Sigma} \cdot i + L_{\Sigma} \frac{di}{dt}; \\ J \frac{dW}{dt} = M - M_{op}; \\ M = c_M \cdot \Phi \cdot i; \\ E = c_e \cdot \Phi \cdot n. \end{cases} \quad (1)$$

де U – напруга на обмотках двигуна;

E – противо-ЕРС в якорі;

R_{Σ} – активний опір усіх обмоток двигуна, а також перехідного опору щіток;

i – струм в обмотках двигуна;

L_{Σ} – індуктивність усіх обмоток двигуна;

$\frac{di}{dt}$ – швидкість зміни струму в електричному колі;

J – сумарний момент інерції якоря і навантаження;

$\frac{dW}{dt}$ – швидкість зміни кутової швидкості обертання вала;

M – електромагнітний момент двигуна;

M_{op} – момент опору руху;

c_M – машинна стала для моменту;

Φ – магнітний потік;

c_e – машинна стала для ЕРС;

n – частота обертання вала двигуна.

Машинна стала для моменту. Її значення можна знайти з наступного виразу [4]:

$$c_M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (2)$$

де p – число пар полюсів;

N – число активних провідників якоря;

a – число пар паралельних гілок простої петльової обмотки.

Для створення математичної моделі стрілочного двигуна, найбільш зручною формою запису є модель в системі простору станів [5]. Модель в змінних стану має вид диференціальних рівнянь, але записується в спеціальній формі – як система рівнянь першого порядку. Суть моделі в змінних стану полягає в тому, що вона зберігає відношення між входом і виходом системи, але в той же час дозволяє перейти від одного диференціального рівняння n -го порядку до системи n диференціальних рівнянь першого порядку. Переваги такого представлення в тому, що окрім двох зовнішніх змінних (вхідної і вихідної), в моделі відображаються і всі внутрішні змінні системи, що дуже важливо для даної задачі, так як електричний струм переводу стрілки є внутрішньою змінною системи. Крім цього модель в змінних стану для стрілочного двигуна постійного струму дозволяє легко вирішувати завдання аналізу й синтезу за допомогою комп'ютера, тоді як використання для тих же цілей передатної функції може виявитися безуспішним через труднощі обчислювального характеру. Також маючи модель у змінних стану, одержується більше інформації про об'єкт керування (про його внутрішні змінні); отже, процедура проектування системи контролю стану стрілочного двигуна може бути виконана більш ефективно, ніж при використанні передатної функції.

З точки зору майбутньої моделі, вхідними впливами є напруга на обмотках двигуна U та момент опору руху M_{op} , який складається з приведенного моменту опору руху до вала двигуна T_L , моментів в'язкого $B_m \cdot W$ та сухого T_f тертя. Вихідні змінні: електромагнітний момент двигуна M , та швидкість обертання вала двигуна W . Змінні стану – змінні, що стоять під знаком похідної: струм в обмотках двигуна i та швидкість обертання вала двигуна W .

Тому, вираз для моменту опору руху можна записати у вигляді:

$$M_{op} = T_L + B_m \cdot W + T_f \quad (3)$$

Механічні втрати врахувати можна наступним чином. Загальні механічні втрати для машин звичайного виконання обраховують наступним чином:

$$P_{мех} = (0,5 \div 2\%) \cdot P_H \quad (4)$$

Зважаючи на невеликі розміри машини, що проектується, використовується найменше значення механічних втрат, тобто для 0,5% від номінальної потужності P_H .

З іншого боку дані втрати розраховуються наступним чином

$$P_{мех} = T_f \cdot W_H + B_m \cdot W_H^2 \quad (5)$$

де T_f – момент сухого тертя;

B_m – коефіцієнт в'язкого тертя;

W_H – номінальна кутова швидкість обертання вала.

Якщо вважати втрати на тертя і вентиляційні втрати приблизно рівними, то, маючи визначене з формули (5) значення механічних витрат $P_{мех}$, обчислюються за наступними формулами

$$T_f = \frac{P_{мех}}{2 \cdot W_H}; \quad (6)$$

$$B_m = \frac{P_{мех}}{2 \cdot W_H^2}. \quad (7)$$

Перепишемо четверте рівняння системи (1) для явно вираженої кутової швидкості обертання вала, оскільки вона є водночас і змінною стану і вихідним параметром:

$$E = \frac{c_e \cdot \Phi \cdot 30}{\pi} \cdot W \quad (8)$$

Перетворимо перше та друге диференціальні рівняння системи (1) до явної форми

Коши і виконаємо підстановку. Система рівнянь прийме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L_\Sigma} \cdot (-R_\Sigma \cdot i - \frac{c_e \cdot \Phi \cdot 30}{\pi} \cdot W + U); \\ \frac{dW}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (c_M \cdot \Phi \cdot i - T_L - B_m \cdot W - T_f); \\ M = c_M \cdot \Phi \cdot i; \\ W = W. \end{cases} \quad (9)$$

Останнє рівняння є відображенням того факту, що змінна стану є одночасно і вихідним параметром.

Введемо наступні позначення:

- вхідні змінні: $u_0 = U$, $u_1 = T_L$;
- вихідні змінні: $y_0 = M$, $y_1 = W$;
- змінні стану: $x_0 = i$, $x_1 = W$.

Отже, матриця вхідних змінних, матриця вихідних змінних, та матриця змінних стану приймуть вид відповідно:

$$u = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ T_L \end{bmatrix},$$

$$y = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ W \end{bmatrix},$$

$$x = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \\ W \end{bmatrix}.$$

А система рівнянь (9) запишеться у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{dx_0}{dt} = -\frac{R_\Sigma}{L_\Sigma} \cdot x_0 - \frac{c_e \cdot \Phi \cdot 30}{\pi \cdot L} \cdot x_1 + \\ + \frac{1}{L_\Sigma} \cdot u_0 + 0 \cdot u_1; \\ \frac{dx_1}{dt} = \frac{c_M \cdot \Phi}{J} \cdot x_0 - \frac{B_m}{J} \cdot x_1 + 0 \cdot u_0 - \\ - \frac{1}{J} \cdot u_1 - \frac{T_f}{J}; \\ y_0 = c_M \cdot \Phi \cdot x_0 + 0 \cdot x_1 + 0 \cdot u_0 + 0 \cdot u_1; \\ y_1 = 0 \cdot x_0 + x_1 + 0 \cdot u_0 + 0 \cdot u_1. \end{cases} \quad (10)$$

Перепишемо систему (10) рівнянь в матричній формі:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot u; \\ y = C \cdot x + D \cdot u. \end{cases} \quad (11)$$

Де матриці коефіцієнтів мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} -\frac{R_{\Sigma}}{L_{\Sigma}} & -\frac{c_e \cdot \Phi \cdot 30}{\pi \cdot L_{\Sigma}} \\ \frac{c_M \cdot \Phi}{J} & -\frac{B_m}{J} \end{bmatrix}, \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{\Sigma}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}, \\
 C &= \begin{bmatrix} c_M \cdot \Phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Необхідно відмітити, що оскільки усі елементи матриці обходу D дорівнюють 0, то в стрілочному двигуні, як у всіх фізичних системах, в усіх каналах між входами і виходами присутні динамічні ланки і вхід не має прямого впливу на вихід через звичайні коефіцієнти передачі.

Висновок

Відповідно до поставленої мети, було розроблено математичну модель стрілочного двигуна постійного струму з послідовним збудженням. Приведена математична модель стрілочного електродвигуна дозволяє теоретично обґрунтувати вибір діагностичних ознак для систем контролю стрілочних переводів за допомогою обчислювальної техніки, підставляючи значення відповідних параметрів. На основі проведених розрахунків запропоновано представити математичну модель в просторі станів, так як це дозволяє визначати його стан за діагностичними ознаками, як складовими матриці коефіцієнтів, що дозволяє більш якісно контролювати стан у порівнянні з представленням стрілочного переводу у вигляді передатних функцій.

Бібліографічний список

1. Маловічко, В. В. Вивчення діагностичних ознак для автоматизованого контролю технічного стану стрілочних електродвигунів [Текст] / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн.

трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 16. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007.

2. Маловічко, В. В. Автоматизований контроль технічного стану стрілочних електродвигунів постійного струму по кривим споживання струму [Текст] / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Х.: Вид-во Укр. Держав. акад. залізн. трансп., 2007. – Вип. 5, 6. – С. 18-21.

3. Черных, И. В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://matlab.ucoz.ru/publ/5-1-0-2>. – Назва з екрану.

4. Безрученко, В. Н. Электрические машины [Текст] / В. Н. Безрученко, А. С. Хотян. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 215 с.

5. Филипс, Ч. Системы управления с обратной связью. [Текст] / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001 – 616 с.

6. Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК [Текст] / С. Г. Герман-Галкин, Г. А. Кардинов. – СПб.: КОРОНА-принт, 2003. – 256 с.

Ключові слова: стрілочний електродвигун, математична модель, діагностичні ознаки, простір станів, диференціальні рівняння, струм переводу стрілки.

Ключевые слова: стрелочный электродвигатель, математическая модель, диагностические признаки, пространство состояний, дифференциальные уравнения, ток перевода стрелки.

Key words: switch motor, mathematical model, diagnostic characters, state space, differential equations, point operation current.

Надійшла до редколегії 22.09.2011.

Прийнята до друку 27.09.2011.