

УДК 62-83:629.4

**Б. І. Мокін**, д. т. н., проф.,  
**С. О. Жуков**, студ.,  
**М. П. Розводюк**, асп.

## **СИНТЕЗ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ТРАМВАЯ**

### **Постановка задачі дослідження**

Складні специфічні умови роботи електрообладнання рухомого складу міського електротранспорту потребують підвищеної їх надійності та високої якості технічного обслуговування [1].

Тяговий двигун є однією з дорогих та трудомістких функціональних систем електричного обладнання трамвая, що ремонтується. Тому в сучасних економічних умовах досить гостро постає питання безвідмовної роботи електричних двигунів. При цьому велике значення в забезпеченні такої експлуатації і зниженні трудових та матеріальних затрат на технічне обслуговування і ремонт електричних двигунів має діагностика [2]. В зв'язку з цим задача діагностування тягових електричних двигунів трамвая є актуальною.

Відомо багато систем для діагностування електричних двигунів трамвая. Недоліки цих систем в тому, що вони працюють на аналогових сигналах, а також те, що всі вони стаціонарні і знаходяться в ремонтних цехах. Метою даної роботи є створення мобільної системи для діагностування електричних двигунів трамвая, яку можна було б встановити безпосередньо у вагоні та здійснювати

---

© Б. І. Мокін, С. О. Жуков, М. П. Розводюк, 2004

діагностування під час руху вагона.

Діагностувати параметри тягових електродвигунів найвигідніше тими методами, які можна використовувати на працюючому обладнанні.

За таких умов пропонується використовувати комбінований метод, який включає в себе контроль завантаженості двигуна по падінню напруги на якорі електричного двигуна і по температурі його обмоток.

Електромеханічна потужність або потужність на валу двигуна постійного струму визначається з формули [3]

$$P_{em} = E_a I_a, \quad (1)$$

де  $E_a$  — проти е.р.с. якоря, В;  $I_a$  — струм якоря, А.

Якщо відома температура обмоток двигуна, то їх опір можна знайти за формулою [4]

$$r_t = r_{20} \left( 1 + \alpha (T_p - 20) \right), \quad (2)$$

де  $r_t$  — шуканий омичний опір обмотки при температурі  $t$  С, Ом;  $r_{20}$  — паспортні дані опору обмоток двигуна при температурі 20 С, Ом;  $\alpha$  — температурний коефіцієнт для мідних проводів обмоток ( $\alpha = 0,004$ );  $T_p$  — температура, при якій вимірювався опір, С.

Якщо відомий дійсний опір якорної обмотки двигуна, то струм якоря можна знайти за формулою [3]

$$I_a = \frac{U_a}{R_{a,t}}, \quad (3)$$

де  $U_a$  — падіння напруги на якорній обмотці, В;  $R_{a,t}$  — опір якорної обмотки при робочій температурі  $t$  °С, Ом.

Проти е.р.с. якоря знаходимо з рівняння напруги для кола якоря двигуна [3]

$$E_a = U - R_{a,t} I_a, \quad (4)$$

де  $U$  — напруга на затискачах двигуна, яку знайдемо з рівняння

$$U = U_M - R_{o.z.,t} I_a = U_M - R_{o.z.,t} \frac{U_a}{R_{a,t}}, \quad (5)$$

де  $U_M$  — напруга, що подається з мережі для живлення двигуна ( $U_M = 300$  В), В;

$R_{o.z.,t}$  — опір обмотки збудження двигуна при робочій температурі  $t$  °С, Ом.

Якщо підставити рівняння (3), (4), (5) в рівняння (1), то отримаємо залежність потужності на валу двигуна від якорної напруги та від температури нагріву обмоток двигуна

$$P_{em} = \left( U_M - R_{o.z.,t} \frac{U_a}{R_{a,t}} - R_{a,t} \frac{U_a}{R_{a,t}} \right) \frac{U_a}{R_{a,t}} = \left( U_M - U_a \frac{(R_{o.z.,t} - R_{a,t})}{R_{a,t}} \right) \frac{U_a}{R_{a,t}}. \quad (6)$$

Система технічного діагностування характеризується, як правило, великою складністю алгоритмів, що реалізуються в системі. Проектування таких систем пов'язане з необхідністю розроблення зручних для аналізу і синтезу способів опису їх функціонування. Моделі кінцевих автоматів зазвичай є незамінним засобом представлення функціонування багатьох систем контролю та управління промисловими об'єктами. Однак класичні мови їх задання не завжди виявляються зручними для опису цих систем. Тому для синтезу структури системи діагностування доцільно застосовувати як математичний апарат — апарат секвенцій [3, 4].

Апарат секвенціального опису є таким же універсальним, як і класична мова кінцевих автоматів у вигляді автоматного графа або автоматних таблиць, однак цей опис є компактнішим. Мова секвенцій дозволяє достатньо легко перейти до структури, яка будується безпосередньо за описом. Цим вона вигідно відрізняється від інших автоматних мов.

### Синтез структури ІВС

Оскільки в процесі діагностування завжди використовуються значення діагностованого параметра в «нормі» і, як мінімум, два інші його значення, одне з яких характеризує відхилення від «норми» в більшу сторону, а друге — в меншу сторону, то мінімальна кількість значень кожного діагностованого параметра в процесі синтезу системи діагностування складає три.

Виходячи з вищевикладеного, будемо синтезувати структуру системи технічного діагностування тягових електричних двигунів трамвая для трьох значень напруги  $U_1, U_2$  та  $U_3$  ( $U_1 < U_2 < U_3$ ) і для трьох значень температури  $t^{\circ}_1, t^{\circ}_2$  та  $t^{\circ}_3$  ( $t^{\circ}_1 < t^{\circ}_2 < t^{\circ}_3$ ), які попередньо оцифруємо за допомогою АЦП, як зображено на рисунку 1, застосовуючи апарат секвенцій.

На рис. 1: ОК — об'єкт контролю, DC — дешифратор, комбінаційна схема — те, що ми далі будемо синтезувати.

Для того, щоб фіксувати вище вказані параметри, будемо використовувати тригери. Позначимо  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  — тригери, які фіксують параметри  $U_1, U_2, U_3, t^{\circ}_1, t^{\circ}_2, t^{\circ}_3$  відповідно.

З метою заповнювання нулями тригерів  $T_7$ — $T_{10}$  і підготовки їх до робочого циклу в граф функціонування системи діагностики додаємо ще одну гілку, що описує сигнал «р», який подається в структуру системи діагностики в момент подачі напруги живлення. Значення логічної змінної виходу  $y = 0$  відповідає стану, коли завантаження двигуна в межах норми. В протилежному випадку  $y = 1$ .

З урахуванням викладеного граф функціонування системи діагностування двигуна матиме вигляд, проілюстрований на рисунку 2.

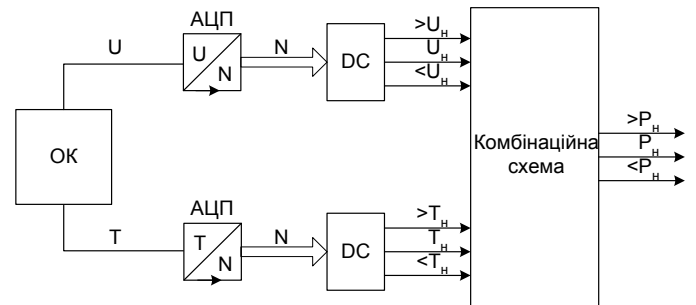


Рис. 1. Структурна схема аналого-цифрового перетворення діагностованих параметрів

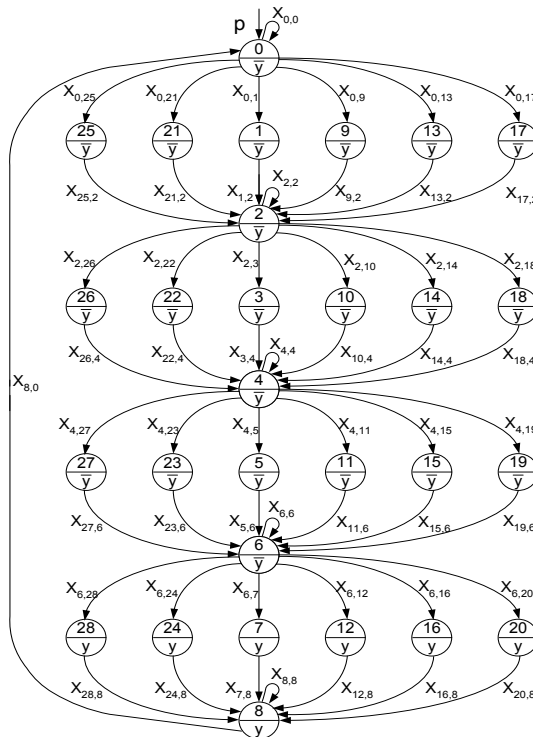


Рис. 2. Граф процесу функціонування системи діагностування тягового електродвигуна трамвая

На цьому рисунку числами (від 0 до 28) позначені стани (наприклад, цифрі 0 відповідає стан  $S_0$ ); символом  $y$  або  $\bar{y}$  — вихідна змінна. Для компактності позначимо символом  $X_{i,j}$  — узагальне-

ну вхідну змінну, при якій система переходить із стану  $S_i$  в стан  $S_j$ .

Аналітично процес функціонування системи діагностування, описаної графом, представленим на рисунку 2, може бути відображений такою системою секвенцій:

$$\begin{aligned}
 & p \mid S_0; & X_{4,11}S_4 \mid S_{11}; & & X_{6,20}S_6 \mid S_{20}; \\
 & X_{0,0}S_0 \mid S_0; X_{11,6}S_{11} \mid S_6; & & & X_{20,8}S_{20} \mid S_8; \\
 & X_{0,1}S_0 \mid S_1; X_{6,12}S_6 \mid S_{12}; & & & X_{0,21}S_0 \mid S_{21}; \\
 & X_{1,2}S_1 \mid S_2; X_{12,8}S_{12} \mid S_8; & & & X_{21,2}S_{21} \mid S_2; \\
 & X_{2,2}S_2 \mid S_2; X_{0,13}S_0 \mid S_{13}; & & & X_{2,22}S_2 \mid S_{22}; \\
 & X_{2,3}S_2 \mid S_3; X_{13,2}S_{13} \mid S_2; & & & X_{22,4}S_{22} \mid S_4; \\
 & X_{3,4}S_3 \mid S_4; X_{2,14}S_2 \mid S_{14}; & & & X_{4,23}S_4 \mid S_{23}; \\
 & X_{4,4}S_4 \mid S_4; X_{14,4}S_{14} \mid S_4; & & & X_{23,6}S_{23} \mid S_6; \\
 & X_{4,5}S_4 \mid S_5; X_{4,15}S_4 \mid S_{15}; & & & X_{6,24}S_6 \mid S_{24}; \\
 & X_{5,6}S_0 \mid S_6; X_{15,6}S_{15} \mid S_6; & & & X_{24,8}S_{24} \mid S_8; \\
 & X_{6,6}S_6 \mid S_6; X_{6,16}S_6 \mid S_{16}; & & & X_{0,25}S_0 \mid S_{25}; \\
 & X_{6,7}S_6 \mid S_7; X_{16,8}S_{16} \mid S_8; & & & X_{25,2}S_{25} \mid S_2; \\
 & X_{7,8}S_7 \mid S_8; X_{0,17}S_0 \mid S_{17}; & & & X_{2,26}S_2 \mid S_{26}; \\
 & X_{8,8}S_8 \mid S_8; X_{17,2}S_{17} \mid S_2; & & & X_{26,4}S_{26} \mid S_4; \\
 & X_{8,0}S_8 \mid S_0; X_{2,18}S_2 \mid S_{18}; & & & X_{4,27}S_4 \mid S_{27}; \\
 & X_{0,9}S_0 \mid S_9; X_{18,4}S_{18} \mid S_4; & & & X_{27,6}S_{27} \mid S_6; \\
 & X_{9,2}S_9 \mid S_2; X_{4,19}S_4 \mid S_{19}; & & & X_{6,28}S_6 \mid S_{28}; \\
 & X_{2,10}S_2 \mid S_{10}; & X_{19,6}S_{19} \mid S_6; & & X_{28,8}S_{28} \mid S_8; \\
 & X_{10,4}S_{10} \mid S_4; & & & 
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$S_7 \vee S_8 \vee S_{12} \vee S_{16} \vee S_{20} \vee S_{24} \vee S_{28} \mid y;$$

$$S_0 \vee S_1 \vee S_2 \vee S_3 \vee S_4 \vee S_5 \vee S_6 \vee S_9 \vee S_{10} \vee S_{11} \vee S_{13} \vee S_{14} \vee S_{15} \vee S_{17} \vee S_{18} \vee S_{19} \vee S_{21} \vee S_{22} \vee S_{23} \vee S_{25} \vee S_{26} \vee S_{27} \mid \bar{y}.$$

У виразах (7):

$$\begin{aligned}
 X_{0,0} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0}; & X_{4,5} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0} \tau_6; & X_{0,9} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0} \tau_8; \\
 X_{0,1} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0} \tau_6; & X_{5,6} &= \tau_5; & X_{9,2} &= \tau_7; \\
 X_{1,2} &= \tau_5; & X_{6,6} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0}; & X_{2,10} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0} \tau_8; \\
 X_{2,2} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0}; & X_{6,7} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0} \tau_6; & X_{10,4} &= \tau_7; \\
 X_{2,3} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0} \tau_6; & X_{7,8} &= \tau_5; & X_{4,11} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0} \tau_8; \\
 X_{3,4} &= \tau_5; & X_{8,8} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0}; & X_{11,6} &= \tau_7; \\
 X_{4,4} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0}; & X_{8,0} &= p; & X_{6,12} &= \overline{U_1} \overline{U_2} \overline{U_3} \overline{t_1^0} \overline{t_2^0} \overline{t_3^0} \tau_8;
 \end{aligned}$$



$$\begin{array}{lll}
U_1 \tau_2 \bar{T}_1 \vdash T_1; & U_3 \tau_6 \bar{T}_3 \vdash T_3; & t_2^0 \tau_{10} \bar{T}_5 \vdash T_5; \\
\tau_1 T_1 \vdash \bar{T}_1; & \tau_5 T_3 \vdash \bar{T}_3; & \tau_9 T_5 \vdash \bar{T}_5; \\
U_2 \tau_4 \bar{T}_2 \vdash T_2; & t_1^0 \tau_8 \bar{T}_4 \vdash T_4; & t_3^0 \tau_{12} \bar{T}_6 \vdash T_6; \\
\tau_3 T_2 \vdash \bar{T}_2; & \tau_7 T_4 \vdash \bar{T}_4; & \tau_{11} T_6 \vdash \bar{T}_6; \\
\\
T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6 \vdash T_7; & & (10) \\
\tau_{12} (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6) T_7 \vdash T_8; \\
\tau_{12} (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6) T_8 \vdash T_9; \\
\tau_{12} (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6) T_9 \vdash T_{10}; \\
p \vdash \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}; \\
T_7 T_8 T_9 T_{10} \vdash y.
\end{array}$$

На основі отриманої системи секвенцій (10) синтезуємо структурну схему системи діагностування електричних двигунів.

Перший етап синтезу полягає в побудові структурної схеми, яка реалізує систему секвенційних рівнянь (10). Кожна з цих секвенцій

реалізується схемою співпадання, на входи якої подаються сигнали, що відповідають кодівій комбінації лівої частини секвенцій, і двостабільним елементом, до входу якого через діодну матрицю під'єднаний вихід схеми співпадання. Якщо код стану двостабільного елемента в правій частині секвенцій не має знаку інверсії, то вихід схеми співпадання з'єднується з прямим входом двостабільного елемента. У випадку наявності інверсії в коді стану вихід схеми співпадання з'єднується з інверсним входом двостабільного елемента.

Схема, що побудована за секвенційними виразами (10), показана на рисунку 3. Вхідні сигнали і сигнали стану поступають на схеми співпадання. Кожному виходу зі схем співпадання відповідає своя стрічка в діодній матриці. Місця вмикання діодів на схемі позначені точками. Кожному стовпцю цієї матриці відповідає один із виходів на двостабільний елемент. Функції виходу на схемі відповідає стовпець зі стрілкою і надписом  $y$ . А запис  $\tilde{T}_1 \tilde{T}_2 \dots \tilde{T}_{10}$  означає кодову комбінацію станів, яка поступає на входи схеми співпадання з виходів двоста-

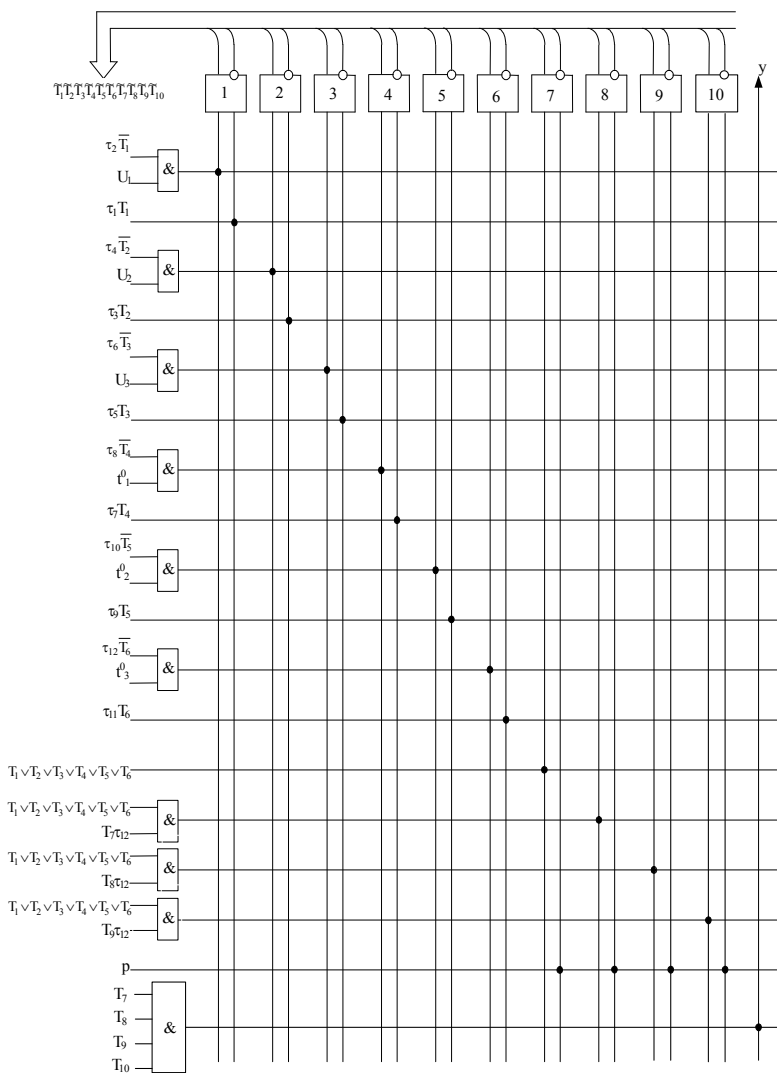


Рис. 3. Структурна схема системи діагностування тягового електродвигуна трамвая

більших елементів. Змінна  $\tilde{T}_i, (i = \overline{1,10})$  може приймати значення або  $T_i$  або  $\overline{T}_i$ .

Аналізуючи викладене вище, легко бачити, що процес синтезу системи діагностування з використанням не трьох, а, скажімо, п'яти значень діагностованих параметрів (по два відхилення від норми в обидва боки), буде відрізнятися лише довгими «ланцюжками» значень параметрів у секвенціальних виразах, не змінюючись по суті.

### Висновок

В даній роботі було обґрунтовано необхідність діагностування тягових двигунів трамвая. Запропоновано комбінований метод діагностування. На основі секвенціального апарату синтезовано структурну схему системи діагностування тягового двигуна трамвая, використовуючи лише три значення діагностованих параметрів: норма та відхилення від норми в більшу чи в меншу сторону. Висока достовірність та швидкодія даного методу дозволить під час роботи виявити несправність в двигуні та попередити його вихід з ладу.

Показано, що аналогічний підхід може бути використаним і при множині значень діагностичних параметрів, більшій трьох.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коган Л. Я. Эксплуатация и ремонт трамваев и троллейбусов. — М.: Транспорт, 1979. — 272 с.
2. Таран В. П., Анлриец В. К., Корчемный Н. А., Синельник А. В. Справочник по эксплуатации электрооборудования. — К.: Техніка, 1985. — 184 с.
3. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. заведений. — 3-е изд., перераб. — Л.: Энергия, 1978. — 832 с.
4. Кулаков Б. М., Резник М. Я. Ремонт трамвайных вагонов. — М.: Транспорт, 1980. — 463 с.
5. Захаров В. Н. Автоматы с распределенной памятью. — М.: «Энергия», 1975. — 136 с.
6. Мокин Б. И., Грабко В. В., Динь Тхань Вьет. Математические модели и информационно-измерительные системы для технической диагностики трансформаторных вводов. — Винница, изд-во ВГТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1997. — 130 с.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації

Надійшла до редакції 20.11.03  
Рекомендована до друку 27.05.04.

Мокин Борис Иванович — завідувач кафедри, Жуков Сергій Олександрович — бакалавр електромеханіки, Розводюк Михайло Петрович — аспірант.

Кафедра моделювання і моніторингу складних систем, Вінницький національний технічний університет