

# АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 62—83:629.4

Б. І. Мокін, д. т. н., проф.;

С. О. Жуков, асп.

## СИСТЕМА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДШИПНИКОВОГО ВУЗЛА ТЯГОВОГО ДВИГУНА ТРАМВАЯ ЗА РІВНЕМ ВІБРАЦІЙ

*Запропоновано математичну модель, на основі якої синтезовано структуру системи для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового двигуна трамвая за рівнем вібрацій. Система дозволяє оцінювати стан підшипників у будь-який момент часу.*

У електричних двигунів малої та середньої потужності, які працюють на відносно великих швидкостях, одне з найбільш слабких місць — підшипниковий вузол.

Вірний діагноз підшипникового вузла в багатьох випадках визначає спроможність працювати усього механізму. Відомо, що кожен вузол електричної машини має свій закон утворення вібрацій, тому при виборі або розробці моделей вібрацій слід враховувати особливості роботи вузлів, що діагностуються [1].

Зібраний підшипниковий вузол можна контролювати тільки методом безрозбірної діагностики. Тому вбачається доцільним використання для оцінки стану підшипникового вузла тягового двигуна трамвая методу вібродіагностики. Це спростить процедуру пошуку дефектів та дозволить виявляти їх на ранніх стадіях.

Причинами вібрацій в підшипниковому вузлі тягового двигуна трамвая можуть бути: невірноваженість, відхилення від співвісності поверхонь вала, порушення геометрії вузлів, дефекти самого підшипника тощо [2].

Наявність дефекту призводить до збільшення амплітуди вібрацій у 2 та більше разів. В зв'язку з цим в якості діагностичного параметра доцільно використовувати середнє або середнє квадратичне значення амплітуд сигналів за певний проміжок часу.

Отже, враховуючи все вище сказане, будемо оцінювати стан підшипникового вузла тягового двигуна трамвая за середнім значенням амплітуди вібрацій підшипників.

### Синтез математичної моделі

Зручним представленням складних сигналів є гармонічний аналіз Фур'є, який дозволяє аналізувати вібрації об'єктів. Аналіз спектрального складу сигналу за допомогою перетворення Фур'є полягає в тому, що сигнал розкладається на синусо- та косинусоїдальні гармоніки. Сума цих гармонік утворює сигнал, що аналізується. Отже вібраційний сигнал, представлений у часовій області, можна отримати у вигляді [3]

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) + \xi(t), \quad (1)$$

де  $a_0, a_1, a_2, a_k, b_1, b_2, b_k$  — амплітуди гармонічних складових вібраційного сигналу;  $\omega$  — кутова швидкість ротора тягового двигуна;  $\xi(t)$  — випадкова складова, що являє собою білий шум з нульовим середнім;  $k$  — номер гармонійної складової.

Амплітуди гармонік визначаються зі співвідношення відповідних коефіцієнтів ряду Фур'є за відомими формулами [3]

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(k\omega_1 t) dt, \quad k = 0, 1, 2, \dots; \quad (2)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(k\omega_1 t) dt, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

де  $\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = \omega$  — частота першої гармоніки, яка дорівнює кутовій швидкості ротора тягового двигуна.

Оцінювати стан підшипникового вузла тягового двигуна трамвая доцільно за середнім квадратичним значенням амплітуди вібрацій. Знайдемо середню квадратичну амплітуду вібрацій за період  $T$

$$x_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}, \quad (4)$$

яку, використовуючи рівність Парсеваля та властивості білого шуму, можна привести до вигляду

$$x_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2)}, \quad (5)$$

Рівняння (5), з урахуванням (2) та (3), і визначає математичну модель функціонування першої частини системи оцінки стану підшипника тягового двигуна трамвая за рівнем вібрацій.

Звичайно, кількість гармонік при практичному застосуванні виразу (5) не береться нескінченною, а обмежується рівнем значущих гармонік, що не виходить за межі двадцяти.

Порівнюючи отримане середнє значення амплітуди вібрацій з еталонним, можна визначити наявність дефекту, а оцінюючи кількісно величину перевищення реальної амплітуди над еталонною, можна визначити де знаходиться дефект.

### Синтез структури пристрою

Для синтезу структури пристрою оцінки стану підшипникового вузла тягового двигуна трамвая доцільно використовувати математичний апарат секвенцій [4, 5].

У зв'язку зі складністю структури пристрою покажемо приклад процесу синтезу для одного підшипника та для трьох значень амплітуди вібрацій, що перевищують норму.

Щоб фіксувати три різні значення амплітуди вібрацій будемо використовувати три тригери. При виділенні кожного значення амплітуди вібрацій будемо використовувати компаратор. Позначимо символами  $A_1, A_2, A_3$  значення амплітуди вібрації, які перевищують перший, другий та третій рівні уставок компараторів. Відповідно  $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3$  буде означати, що амплітуда вібрацій менша кожного порога спрацювання. Позначимо  $T_1, T_2, T_3$  — тригери, що фіксують перший, другий і третій рівні уставок компараторів.

Оскільки при різних значеннях амплітуди коливань блок індикації повинен реагувати по-різному, введемо елементи часової затримки  $\tau_1$  і  $\tau_2$  у відповідності з  $T_1, T_3$ ;  $\tau_4$  у відповідності з  $T_2, T_5$  і  $\tau_6$  у відповідності з  $T_3$ . Елементи  $\tau_1, \tau_3, \tau_5$  характеризують тривалість імпульсу, що подається на вхід блоку індикації, а  $\tau_2, \tau_4, \tau_6$  — тривалість паузи до початку наступного циклу роботи системи. Причому

$$\tau_1 + \tau_2 = \tau_3 + \tau_4 = \tau_5 + \tau_6 = \tau_0, \quad (6)$$

де  $\tau_0$  — тривалість одного циклу роботи системи.

Для запам'ятовування імпульсів введемо тригери  $T_4, T_5, T_6$ .

Оскільки пристрій повинен працювати циклічно (тривалість одного циклу визначається часом інтегрування), введемо сигнал  $R$ , який буде повертати усі тригери у початковий стан та починати новий цикл роботи пристрою.

Логічна змінна  $y = 1$  відповідатиме роботі блоку індикації (наявності сигналу на його вході). В іншому випадку  $y = 0$ .

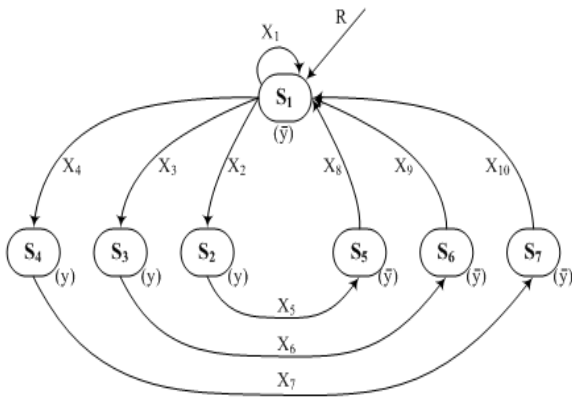


Рис. 1. Граф функціонування пристрою оцінки стану підшипника за рівнем вібрацій

З врахуванням цього граф функціонування пристрою оцінки стану підшипника матиме вигляд, наведений на рис. 1 [6].

Аналітично функціонування пристрою оцінки стану може бути описано системами секвенцій (7—9).

Підставивши (8) і (9) у (7) та здійснивши мінімізацію отриманої системи секвенційних виразів, використовуючи властивості секвенцій [4, 5], отримаємо еквівалент цієї системи у вигляді (10). Секвенціальна система (10) визначає математичну модель функціонування другої частини пристрою оцінки стану підшипника за рівнем вібрацій.

$$\begin{aligned}
 & R \mid S_1; \\
 & \bar{R} S_1 \mid S_1; \\
 & X_1 S_1 \mid S_1; \\
 & X_2 S_1 \mid S_2; \\
 & X_3 S_1 \mid S_3; \\
 & X_4 S_1 \mid S_4; \\
 & X_5 S_2 \mid S_5; \\
 & X_6 S_3 \mid S_6; \\
 & X_7 S_4 \mid S_7; \\
 & X_8 S_5 \mid S_1; \\
 & X_9 S_6 \mid S_1; \\
 & X_{10} S_7 \mid S_1; \\
 & S_1 \vee S_5 \vee S_6 \vee S_7 \mid \bar{y}; \\
 & S_2 \vee S_3 \vee S_4 \mid y,
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 X_1 &= R\bar{A}_1\bar{A}_2\bar{A}_3; \\
 X_2 &= RA_1\bar{A}_2\bar{A}_3; \\
 X_3 &= R\bar{A}_1A_2\bar{A}_3; \\
 X_4 &= R\bar{A}_1\bar{A}_2A_3; \\
 X_5 &= \tau_1; \\
 X_6 &= \tau_3; \\
 X_7 &= \tau_5; \\
 X_8 &= \tau_2 = \tau_0 - \tau_1; \\
 X_9 &= \tau_4 = \tau_0 - \tau_3; \\
 X_{10} &= \tau_6 = \tau_0 - \tau_5;
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 & \bar{T}_1\bar{T}_2\bar{T}_3\bar{T}_4\bar{T}_5\bar{T}_6 \in S_1; \\
 & T_1\bar{T}_2\bar{T}_3\bar{T}_4\bar{T}_5\bar{T}_6 \in S_2; \\
 & \bar{T}_1T_2\bar{T}_3\bar{T}_4\bar{T}_5\bar{T}_6 \in S_3; \\
 & \bar{T}_1\bar{T}_2T_3\bar{T}_4\bar{T}_5\bar{T}_6 \in S_4; \\
 & T_1\bar{T}_2\bar{T}_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6 \in S_5; \\
 & \bar{T}_1T_2\bar{T}_3\bar{T}_4T_5\bar{T}_6 \in S_6; \\
 & \bar{T}_1\bar{T}_2T_3\bar{T}_4\bar{T}_5T_6 \in S_7;
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 & R \mid \bar{T}_1\bar{T}_2\bar{T}_3\bar{T}_4\bar{T}_5\bar{T}_6; \\
 & RA_1\bar{T}_1 \mid T_1; \\
 & RA_2\bar{T}_2 \mid T_2; \\
 & RA_3\bar{T}_3 \mid T_3; \\
 & \tau_1 T_1\bar{T}_4 \mid T_4; \\
 & \tau_3 T_2\bar{T}_5 \mid T_5; \\
 & \tau_5 T_3\bar{T}_6 \mid T_6; \\
 & \tau_2 T_1T_4 \mid \bar{T}_1\bar{T}_4; \\
 & \tau_4 T_2T_5 \mid \bar{T}_2\bar{T}_5; \\
 & \tau_6 T_3T_6 \mid \bar{T}_3\bar{T}_6; \\
 & T_1\bar{T}_4 \vee T_2\bar{T}_5 \vee T_3\bar{T}_6 \mid y.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

На підставі отриманої математичної моделі (10) синтезуємо структурну схему пристрою оцінки стану підшипника за рівнем вібрацій. Перший етап синтезу полягає в побудові структурної схеми, яка реалізує систему секвенційних рівнянь (10). Схема, яка побудована по секвенційним виразам (10) показана на рис. 2.

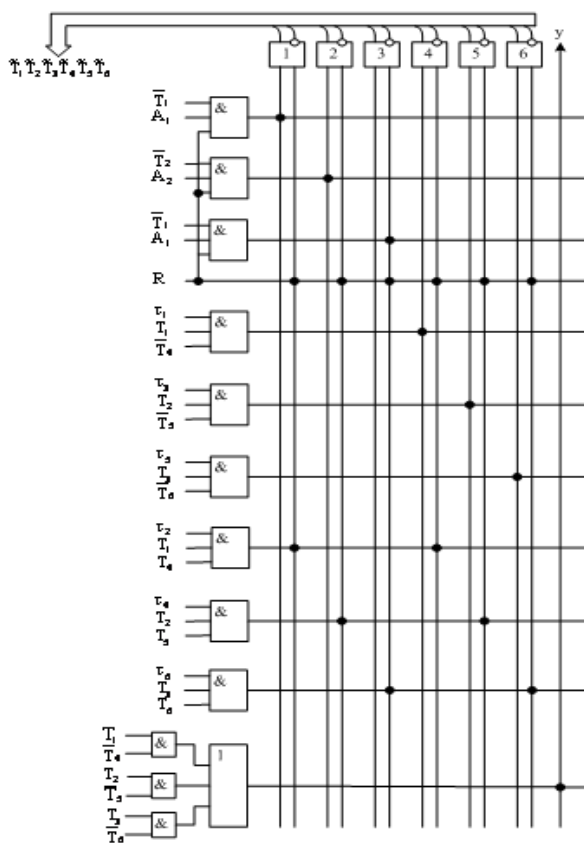


Рис. 2. Функціональна схема пристрою оцінки стану підшипника

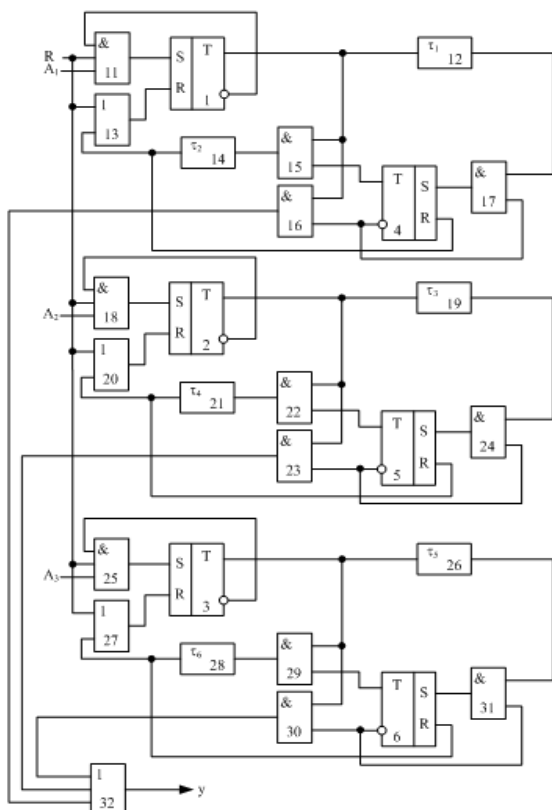


Рис. 3. Структурна схема пристрою оцінки стану підшипника після перетворення

Вхідні сигнали та сигнали стану подаються на схеми співпадання. Кожному виходу зі схем співпадання відповідає свій рядок в діодній матриці. Місця включення діодів на схемі відмічені крапками. Кожному стовпцю цієї матриці відповідає один з виходів двостабільного елемента. Запис  $\tilde{T}_1 \tilde{T}_2 \tilde{T}_3 \tilde{T}_4 \tilde{T}_5 \tilde{T}_6$  позначає кодову комбінацію станів, які подаються на входи схеми співпадання двостабільних елементів.

Змінна  $\tilde{T}_i (i = 1, 2, \dots, 7)$  може приймати значення або  $\bar{T}_i$  або  $T_i$ .

### Практична реалізація синтезованої структури

На другому етапі синтезу структури пристрою оцінки стану підшипника отриману функціональну схему пристрою зображуємо у зручному для реалізації в обраній елементній базі вигляді. Для цього спочатку перетворимо функціональну схему, зображену на рисунку 2, у такий спосіб, щоб замінити з'єднання елементів через діодну матрицю безпосереднім з'єднанням. В результаті отримаємо схему, зображену на рисунку 3.

Перетворимо схему до вигляду, зручного для реалізації з використанням серійної елементної бази. Також до схеми додамо елементи, які будуть обробляти вхідний сигнал згідно з математичною моделлю (6). А також врахуємо те, що на рисунку 3 зображена структурна схема оцінки стану одного підшипника, а нам потрібно побудувати схему для підшипникового вузла, який складається з двох підшипників. З урахуванням вищесказаного структурна схема матиме вигляд, показаний на рис. 4 [7, 8].

На схемі: 1, 51 — вібродатчики ВД, що встановлені відповідно на корпусі першого та другого підшипників; 2, 52 — підсилювачі сигналу П; 3, 53 — пристрої вибірки та зберігання ПВЗ; 4, 54 — АЦП А/D; 5, 8, 24, 37, 55, 58 — компаратори; 6, 56 — блоки індикації; 7, 10, 13, 26, 38, 46, 49, 57 — логічні елементи «І»; 9, 12, 17, 30, 32, 45, 48 — генератори імпульсів G; 11, 14, 18, 22, 31, 35, 39, 47, 50 — двійкові лічильники СТ2; 15, 16, 25, 40, 43, 44 — формувачі імпульсів FI; 19, 41 — логічні елементи «НІ»; 20, 42 — регістри RG; 27 — цифровий сенсор швидкості обертання ротора двигуна СШ; 21, 23, 28, 34, 36 — функціональні перетворювачі ФП; 29, 33 — цифрові суматори.

Пристрій складається з двох частин (для двох підшипників), які мають однаковий принцип роботи, тому пояснимо роботу однієї з них. З вібродатчика 1 після підсилювача 2 сигнал надходить на перший вхід пристрою вибірки та зберігання 3, на другий вхід якого надходять імпульси з генератора імпульсів 17. Елемент вибірки та зберігання дискретизує сигнал з вібродатчика, а крок дискретизації задається частотою генератора імпульсів 17. Сигнали з виходу елемента вибірки та зберігання надходять на вхід АЦП 4, з виходу якого на перший вхід компаратора 5.

Коли на перший вхід компаратора 5 надходить сигнал, то на його виході формується сигнал логічної одиниці, який відкриває логічний елемент 10, до другого входу якого підключений генератор імпульсів 9. Частота генератора 9 повинна бути дуже високою, щоб він встигав за час паузи між імпульсами, які надходять на вхід компаратора 5 видати кількість імпульсів, еквівалентну амплітуді імпульсу. Імпульси з генератора 9 через логічний елемент 10 надходять на двійковий лічильник 11. Коли на виході лічильника 11 сформується значення амплітуди імпульсу, який надійшов на перший вхід компаратора 5, то на виході компаратора 5 сформується

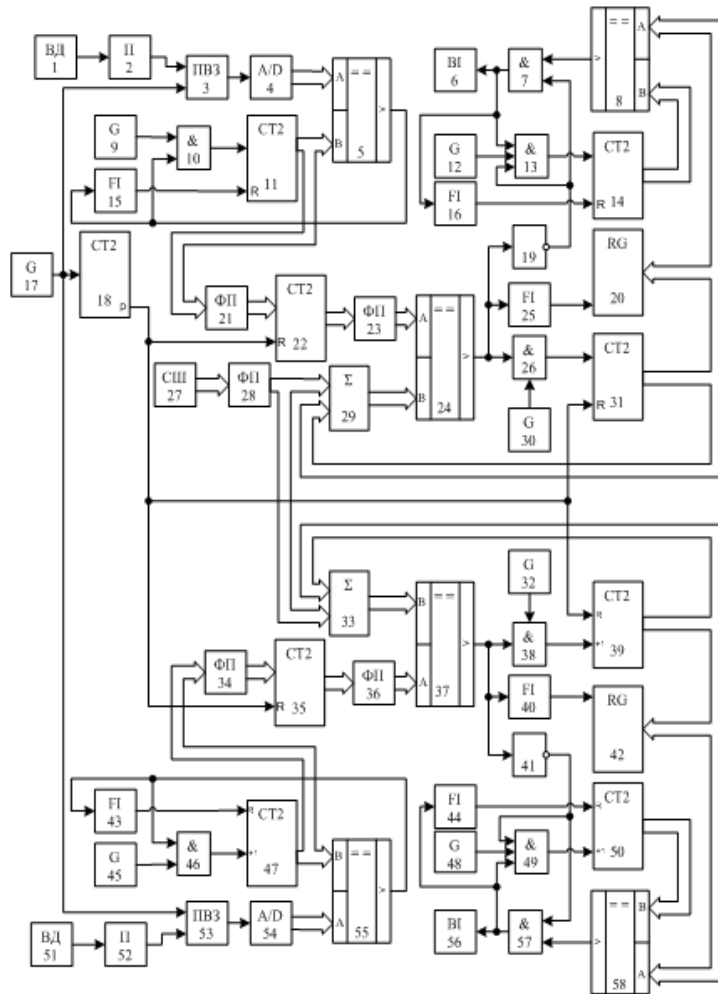


Рис. 4. Структурна схема системи оцінки стану підшипникового вузла, що реалізована на елементах, які випускаються серійно

сигнал логічного нуля, що закриває логічний елемент 10, а також змусить формувач імпульсів 15 виробити одиничний імпульс, який обнулить двійковий лічильник 11. Функціональний перетворювач 21 підносить до квадрату значення, яке надходить на його вхід, далі це значення записується у лічильник 22. Двійковий лічильник 22 обнулюється тоді, коли закінчується цикл роботи схеми. За тривалістю циклу роботи схеми слідкує двійковий лічильник 18, який після підрахунку потрібної кількості імпульсів, що надходять від генератора імпульсів 17, подає сигнал логічної одиниці з виходу «р» (переповнення), потім обнулюється і починає новий цикл.

Таким чином двійковий лічильник 22 буде виконувати роль суматора, підраховуючи квадрати значень амплітуд імпульсів, які надходять на його вхід за час циклу роботи схеми. Функціональний перетворювач 23 перетворює вхідний сигнал як корінь квадратний. Отже на виході функціонального перетворювача 23 отримаємо середнє квадратичне значення амплітуди вібрацій за один цикл роботи схеми. Це значення за допомогою компаратора 24 порівнюємо з еталонним значенням амплітуди вібрацій. Еталонне значення отримуємо з виходу функціонального перетворювача 28, до входу котрого підключений вихід сенсора швидкості 27 обертання ротора двигуна. Якщо середнє значення амплітуди вібрацій перевищує еталонне, на виході компаратора 24 формується сигнал логічної одиниці, котрий відкриває логічний елемент 26, до другого входу якого підключений генератор імпульсів 30. Поки логічний елемент 26 відкритий, імпульси з генератора імпульсів 30 надходять на вхід двійкового лічильника 31, вихід якого підключений до другого входу цифрового суматора 29. Цифровий суматор 29 буде додавати цей сигнал до еталонного значення допоки сигнал на виході суматора 29 не стане рівним середньому квадратичному значенню амплітуди вібрацій, що надходить на перший вхід компаратора 24. Коли сигнали стануть однаковими, на виході компаратора 24 сформується сигнал логічного нуля. В цей час у двійковому

лічильнику 31 буде записана величина перевищення еталонного значення амплітуди вібрацій. Сигнал логічного нуля на виході компаратора 24 змусить формувач імпульсів 25 подати сигнал логічної одиниці на керуючий вхід регістра 20, а також, інвертуючись в логічному елементі 19, відкриє логічні елементи 7 та 13. Сигнал з виходу двійкового лічильника 31 записується в регістр 20 та надходить на перший вхід компаратора 8. На виході компаратора 8 формується сигнал логічної одиниці, який через відкритий логічний елемент 7 потрапляє на вхід блоку індикації 6. Блок індикації 6 реагує на появу сигналу на його вході, причому тривалість цієї реакції буде безпосередньо залежати від значення сигналу, що надходить на вхід компаратора 8. Двійковий лічильник 14 буде підраховувати імпульси, які надходять через логічний елемент 13 з виходу генератора імпульсів 12. Коли двійковий лічильник 14 нарахує необхідну кількість імпульсів і сигнали на обох входах компаратора 8 стануть однаковими, на виході компаратора 8 сформується сигнал логічного нуля, реакція блоку індикації скінчиться, за допомогою формувача імпульсів 16 обнулиться двійковий лічильник 14. Цикл роботи схеми закінчився. Отже блок індикації не тільки реагує на перевищення допустимої амплітуди вібрацій, але й візуально показує величину цього перевищення у вигляді тривалості своєї реакції. Водію трамвая достатньо буде такої індикації, для того щоб оцінити стан підшипникового вузла. А детальніше оцінити рівень вібрацій можна буде, отримавши інформацію з регістра 20, який фіксує значення усіх перевищень допустимого значення амплітуди вібрацій.

Частина схеми 32—58 працює аналогічно, слідкуючи за станом другого підшипника.

### Висновок

Запропонована математична модель, на основі якої синтезовано структуру пристрою оцінки стану підшипникового вузла тягового двигуна трамвая за рівнем вібрацій. Пристрій дозволяє оцінити стан підшипників у будь-який момент часу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин / И. Г. Шубов — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 208 с.
2. Марченко Б. Г. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин / Б. Г. Марченко, М. В. Мыслович / АН Украины. Ин-т эл. машин. — К.: Наук. думка, 1992. — 195 с.
3. Филиппов Л. И. Принципы аналитического представления и дискретизации сигналов / Л. И. Филиппов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2000. — № 10 — С. 35—47.
4. Лазарев В. Г. Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль — М.: Энергия, 1978 — 408 с.
5. Захаров В. Н. Автоматы с распределённой памятью / Захаров В. Н. — М.: Энергия, 1975. — 136 с.
6. Зыков А. А. Основы теории графов / А. А. Зыков — М.: Наука, 1987. — 381 с.
7. Основы цифровых систем: [підручник] / за ред. М. П. Благодатного, В. С. Марченка. — Харків: Нац. Аерокосмічний ун-т, 2002. — 672 с.
8. Схемотехніка електронних систем: у 3 кн.: [підручник] / В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйкою; — [2-е вид. пер. і доп.]; кн. 3: Мікропроцесори та мікроконтролери. — К.: Вища школа., — 2004. — 399 с.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматички

Надійшла до редакції 21.10.08  
Рекомендована до друку 20.11.08

*Мокін Борис Іванович* — професор кафедри електричних систем автоматизації в промисловості та на транспорті, *Жуков Сергій Олександрович* — аспірант кафедри моделювання та моніторингу складних систем.

Вінницький національний технічний університет