— в усіх інших випадках передатна характеристика має скачкоподібний характер, таким чином до похибки масштабу додасться похибка нелінійності $\Delta_н$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Щвецкий Б. И. Электронные цифровые приборы. — К.: Техніка, 1991, — С. 54.
2. Пухов Г. Е. Справочник по аналоговой вычислительной технике.— К.: Техніка, 1975, — С. 368—370.
3. Азаров А. Д., Захарченко С. М. Разработка высокоточного самокорректирующегося конденсаторного АЦП // Научный симпозиум: Проблемы создания преобразователей формы информации. — Тез. докл. — Киев, 1992 — С. 97—98.

Кафедра обчислювальної техніки

УДК 621.317

АНАЛІЗ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Асп. Кучерук В. Ю., канд. техн. наук, доц. Кухарчук В. В.

Кутова швидкість обертання ω_r ротора є одним із найбільш інформативних параметрів електричної машини. Дана фізична величина є визначальною під час проведення досліду «холостого ходу», як в статичному, так і в динамічному режимі роботи електричної машини. В статичному режимі ω_r використовують для визначення механічної характеристики $M = f(\omega_r)$, а в динамічному режимі — залежностей $\omega_r = f(t)$, $\frac{d\omega_r}{dt} = f(\omega_r, t)$, $M_d = J\frac{d\omega_r}{dt} = f(\omega_r, t)$.

В теперішній час для вимірювання ω_r в статичному режимі використовують цифрові тахометри середніх, а в динамічному — миттєвих значень. Основними елементами тахометрів [1] є: об'єкт вимірювання (ОВ); муфта спряження (МС); сенсор швидкості обертання (СШО); цифровий частотомір (ЦЧ). Режим роботи ОВ визначає архітектуру побудови ЦЧ. В статичному режимі застосовують схему частотоміра середніх значень, принцип дії якої засновано на підрахунку кількості імпульсів вихідної частоти сенсора f_c за зразковий часовий інтервал. В динамічному режимі має місце схема цифрового періодоміра (частотоміра миттєвих значень), принцип дії якого полягає у квантуванні періоду T_c імпульсами зразкової частоти.

Метою даної роботи є обгрунтування можливості застосування цифрового тахометра миттєвих значень для вимірювання кутової швидкості, як в статичному, так і в динамічному режимі роботи електричної машини з покращеними метрологічними характеристиками.

Виконаємо аналіз виділених структурних елементів даного засобу вимірювальної техніки.

Як об'єкт вимірювання виберемо асинхронну машину, яка за допомогою МС з'єднується із вхідним валом СШО. Неправильний вибір МС приводить до значної похибки вимірювання ω_r [2]. Щоб з'ясувати вплив МС на результати вимірювання ω_r, розглянемо її як пружну муфту [3]. Кути повороту ОВ і валу СШО позначимо відповідно $\varphi_д$ і $\varphi_м$. Приведений до ОВ момент інерції муфти і сенсора $J_м$ та момент інерції рухомих частин машини $J_м$ вважаємо постійними.

Позначимо через $M_д$ приведений до валу машини момент сил і через M_0 — модуль моменту сил опору, що приведений до вхідного валу сенсора. Тоді рівняння руху для узагальнених координат $\varphi_д(t)$ та $\varphi_м(t)$ мають вигляд:

$$\begin{cases} J_д\frac{d\omega_r}{dt} = M_д - c(\varphi_д - \varphi_м) - b(\omega_r - \omega_м); & \frac{d\varphi_д}{dt} = \omega_r; \\ J_м\frac{d\omega_м}{dt} = c(\varphi_д - \varphi_м) + b(\omega_r - \omega_м) - M_0; & \frac{d\varphi_м}{dt} = \omega_м, \end{cases} \quad (1)$$

де c — коефіцієнт жорсткості МС, Нм/рад; b — коефіцієнт демпфування муфти, Нм/рад^2; $\omega_м$ — швидкість обертання валу СШО.

Параметри $\omega_r(t)$ і $M_д(t)$ знаходять як розв'язок системи диференціальних рівнянь асинхронної машини [4]:

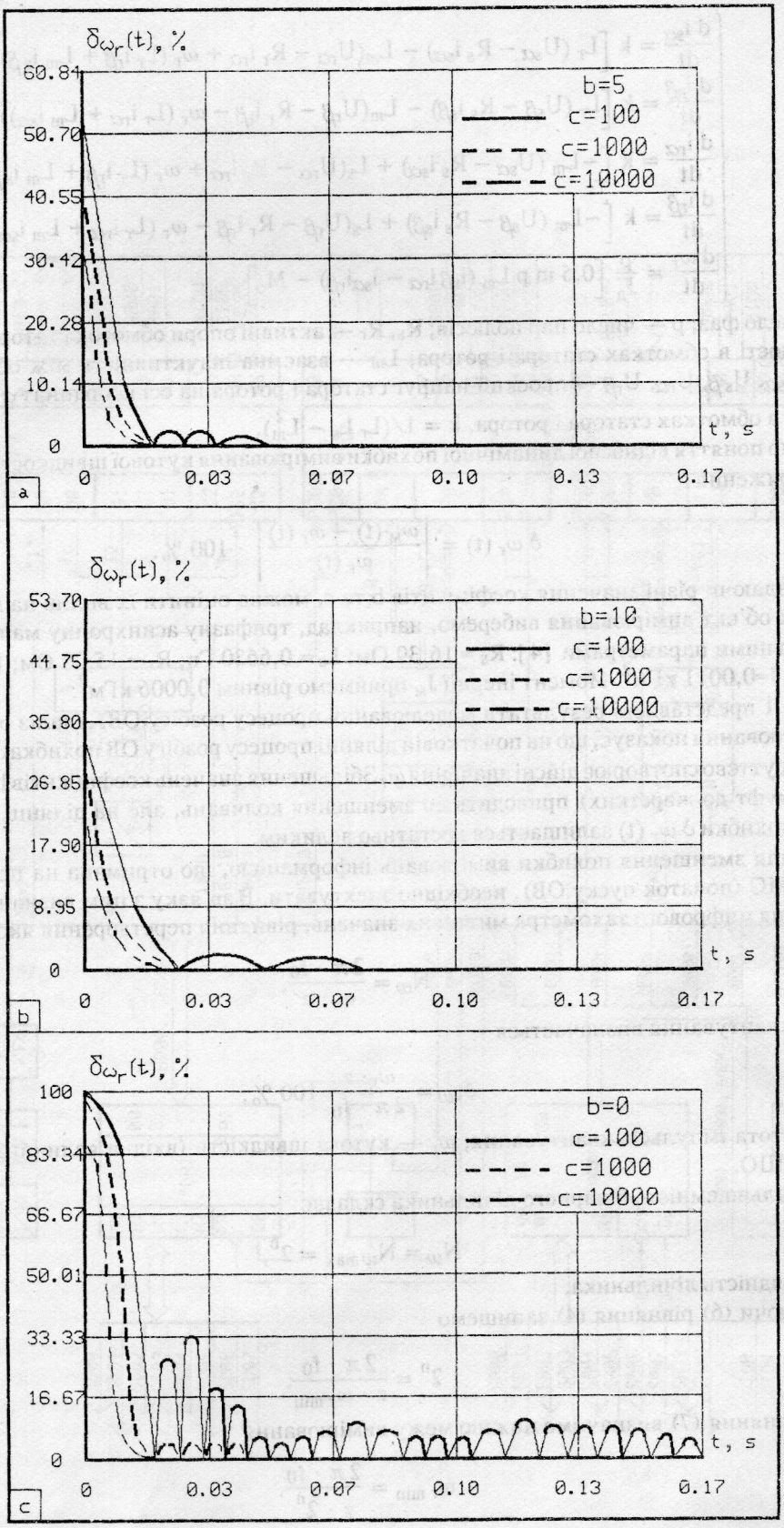

Рис. 1. До питання моделювання процесу розбігу об'єму вимірювання

$$\begin{cases} \dfrac{d\, i_{s\alpha}}{dt} = k\left[L_r\,(U_{s\alpha} - R_s\, i_{s\alpha}) - L_m(U_{r\alpha} - R_r\, i_{r\alpha} + \omega_r\,(L_r\, i_{r\beta} + L_m\, i_{s\beta}))\right]; \\ \dfrac{d\, i_{s\beta}}{dt} = k\left[L_r\,(U_{s\beta} - R_s\, i_{s\beta}) - L_m(U_{r\beta} - R_r\, i_{r\beta} - \omega_r\,(L_r\, i_{r\alpha} + L_m\, i_{s\alpha}))\right]; \\ \dfrac{d\, i_{r\alpha}}{dt} = k\left[-L_m\,(U_{s\alpha} - R_s\, i_{s\alpha}) + L_s(U_{r\alpha} - R_r\, i_{r\alpha} + \omega_r\,(L_r\, i_{r\beta} + L_m\, i_{s\beta}))\right]; \\ \dfrac{d\, i_{r\beta}}{dt} = k\left[-L_m\,(U_{s\beta} - R_s\, i_{s\beta}) + L_s(U_{r\beta} - R_r\, i_{r\beta} - \omega_r\,(L_r\, i_{r\alpha} + L_m\, i_{s\alpha}))\right]; \\ \dfrac{d\,\omega_r}{dt} = \dfrac{p}{J_д}\left[0{,}5\ m\ p\ L_m\,(i_{s\beta}\, i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) - M_o\right], \end{cases} \tag{2}$$

де m — число фаз; p — число пар полюсів; R_s, R_r — активні опори обмоток статора і ротора; L_s, L_r — індуктивності в обмотках статора і ротора; L_m — взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора; $U_{s\alpha}$, $U_s\beta$, $U_{r\alpha}$, $U_{r\beta}$ — проекції напруг статора і ротора на осі координат α, β, 0; $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ — струми в обмотках статора і ротора, $k = 1/(L_r\, L_s - L_m^2)$.

Введемо поняття відносної динамічної похибки вимірювання кутової швидкості $\delta\,\omega_r\,(t)$ від впливу муфти спряження

$$\delta\,\omega_r\,(t) = \left|\frac{\omega_м\,(t) - \omega_r\,(t)}{\omega_r\,(t)}\right| \cdot 100\ \%. \tag{3}$$

Тоді, задаючи різні значення коефіцієнтів b та c, можна оцінити їх вплив на величину похибки $\delta\,\omega_r\,(t)$. Як об'єкт вимірювання виберемо, наприклад, трифазну асинхронну машину типу 4А71А4 із номінальними параметрами [4]: $R_s = 16{,}39$ Ом; $L_s = 0{,}6630$ Гн; $R_r = 15{,}08$ Ом; $L_r = 24{,}33$ Гн; $L_m = 0{,}624$ Гн; $J = 0{,}0011$ кГм^2. Момент інерції $J_м$ приймемо рівним 0,0006 кГм^2.

На рис. 1 представлені результати моделювання процесу розбігу ОВ. Аналіз одержаних результатів моделювання показує, що на початковій ділянці процесу розбігу ОВ похибка $\delta\,\omega_r$ може досягати 100 %, що суттєво спотворює дійсні значення ω_r. Збільшення значень коефіцієнтів b та c (наближення пружних муфт до жорстких) приводить до зменшення коливань, але на ділянці часу $t \in [0;\ 0{,}02]$ значення похибки $\delta\,\omega_r\,(t)$ залишається достатньо великим.

Отже, для зменшення похибки вимірювань інформацією, що отримана на протязі перехідного процесу у МС (початок пуску ОВ), необхідно знехтувати. В зв'язку з цим визначимо нижню межу вимірювання цифрового тахометра миттєвих значень, рівняння перетворення якого має вигляд

$$N_\omega = \frac{2\pi \cdot f_0}{\omega_r \cdot z}, \tag{4}$$

а похибка квантування визначається

$$\delta_{k\omega} = \frac{\omega_r \cdot z}{2\pi \cdot f_0}\ 100\ \%, \tag{5}$$

де f_0 — частота імпульсів квантування; ω_r — кутова швидкість (вхідна величина); z — роздільна здатність СШО.

Максимальна ємність бінарного лічильника складає

$$N_\omega = N_{\omega\,max} = 2^n, \tag{6}$$

де n — розрядність лічильника.

Враховуючи (6) рівняння (4) запишемо

$$2^n = \frac{2\pi \cdot f_0}{z \cdot \omega_{r\,min}}. \tag{7}$$

Тоді з рівняння (7) визначимо нижню межу вимірювання

$$\omega_{r\,min} = \frac{2\pi \cdot f_0}{z \cdot 2^n}. \tag{8}$$

Верхня межа вимірювання $\omega_{r\,max}$ для тахометра миттєвих значень визначається із рівняння похибки квантування (5)

$$\omega_{r\,max} = \frac{2\pi \cdot \delta_{kн} \cdot f_0}{\omega_r \cdot 100\ \%}, \tag{9}$$

де $\delta_{kн}$ — нормоване значення похибки квантування.

Задаючись величиною $\delta_{kн} = 1{,}0$ %, отримаємо

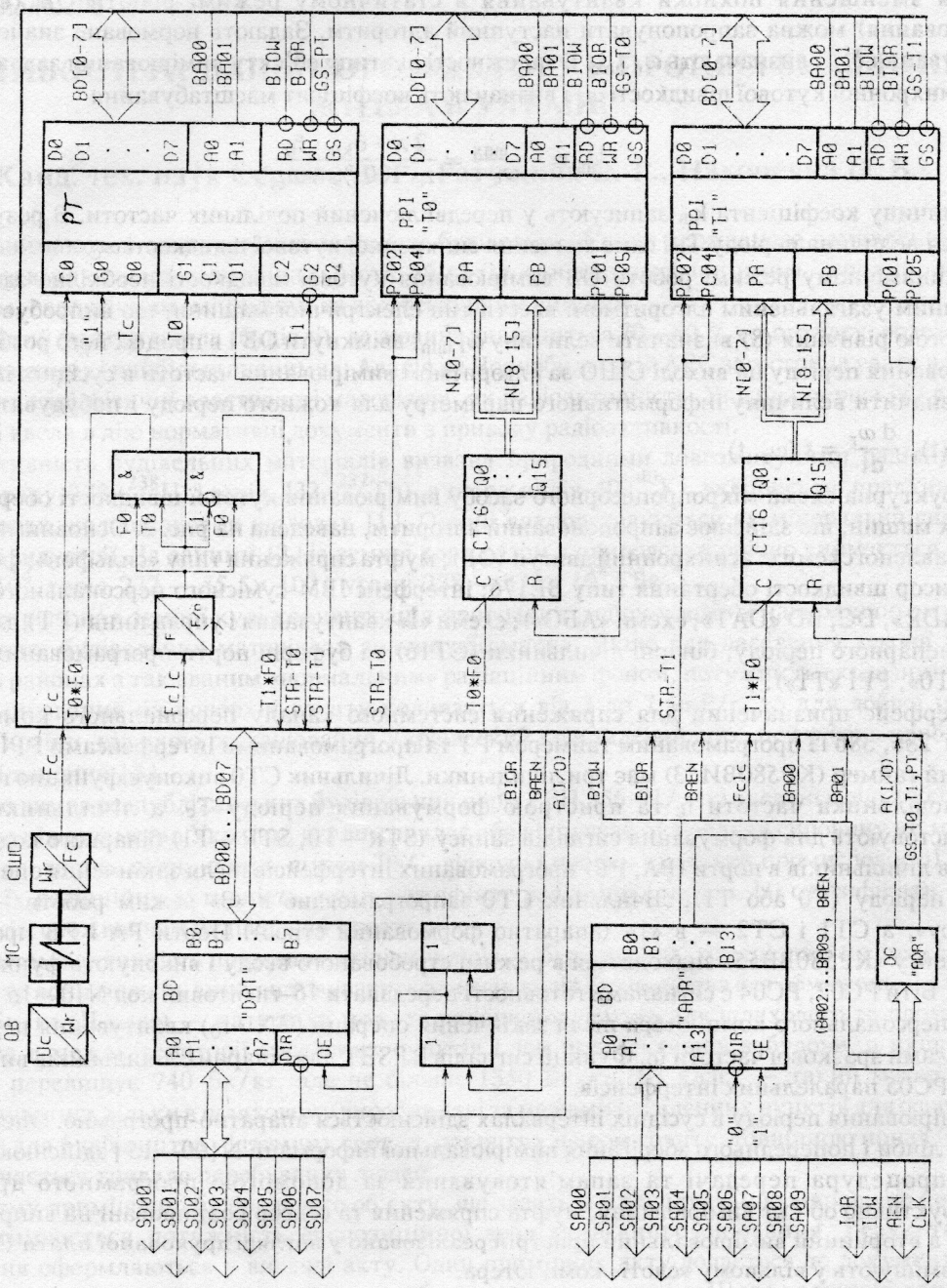

Рис. 2. Структурна схема мікропроцесорного засобу вимірювання кутової швидкості

$$\omega_{r\,max} = 314 \text{ рад/сек} \quad \left| \begin{array}{l} f_0 = 5 \cdot 10^6 \text{ Гц} \\ n = 16 \\ z = 1000 \end{array} \right| .$$

Таким чином, за рахунок зміщення нижньої межі вимірювання і діапазону в цілому, можна використовувати схему тахометра миттєвих значень для вимірювання кутової швидкості як в статичному, так і в динамічному режимі роботи електричної машини з наперед заданою похибкою квантування.

Для зменшення похибки квантування в статичному режимі роботи ОВ (верхня межа вимірювання) можна запропонувати наступний алгоритм. Задають нормоване значення похибки квантування $\delta_{kн}$ і визначають $\omega_{r\,max}$. В залежності від типу об'єкту вимірювання задають величину його синхронної кутової швидкості ω_c і визначають коефіцієнт масштабування

$$k_m = \frac{\omega_{r\,max}}{\omega_c} = \frac{2\pi \cdot \delta_{kн} \cdot f_0}{z \cdot 100\,\% \cdot \omega_c} . \qquad (10)$$

Величину коефіцієнта k_m записують у передвключений подільник частоти. В результаті зменшується величина періоду T_c і саме значення синхронної кутової швидкості ω_c.

В динамічному режимі роботи ОВ вимірювання кутової швидкості необхідно здійснювати за наступним узагальненим алгоритмом: ввести тип електричної машини, що випробується (ОВ); за допомогою рівняння (8) визначити величину $\omega_{r\,min}$; ввімкнути ОВ і в процесі його розбігу здійснити вимірювання періоду на виході СШО за алгоритмом вимірювання частоти в сусідніх інтервалах; за (4) визначити величину інформативного параметру для кожного періоду і побудувати залежності $\omega_r = f(t)$, $\frac{d\omega_r}{dt} = f(\omega_r, t)$.

Структурна схема мікропроцесорного засобу вимірювання кутової швидкості обертання електричних машин, що здійснює запропонований алгоритм, наведена на рис. 2. Основними елементами представленої схеми є: асинхронний двигун (ОВ); муфта спряження типу «сильфон»; фотоелектричний сенсор швидкості обертання типу BE176; інтерфейс IBM-сумісного персонального комп'ютера (BD «ADR», DC, BD «DAT», схеми «АБО»); схеми «І» квантування і управління (РТ) для парного T_0 та T_1 непарного періоду; бінарні лічильники (СТ16) та буферні порти програмованих інтерфейсів (РРІ «Т0», РРІ «Т1»).

Інтерфейс призначений для спряження системного каналу персонального комп'ютера ІВМ РС/АТ 286, 386 із програмованим таймером РТ та програмованими інтерфейсами РРІ [5]. Програмований таймер (КР580ВИ53) має три лічильники. Лічильник СТ0 виконує функцію передвключеного подільника частоти f_c та пристрою формування періоду T_c, а лічильники СТ1, СТ2 використовують для формування сигналів запису (STR—T0, STR—T1) бінарного коду N[0—15] з виходів лічильників в порти (РА, РВ) програмованих інтерфейсів після закінчення операції квантування періоду (Т0 або Т1). Лічильник СТ0 запрограмовано в «3» режим роботи — «генератор меандру», а СТ1 і СТ2 — в «1» (апаратно формований строб). Порти РА і РВ програмованого інтерфейсу (КР580ВВ55) знаходяться в режимі стробованого вводу і виконують функції буферних портів. Біти РС02, РС04 є сигналами готовності передавати 16-ти бітовий код N[0—15] в системний канал персонального комп'ютера після закінчення операції ($TX \cdot f_0$) квантування періодів Т0, Т1 імпульсами зразкової частоти f_0. Функції сигналів RESET для бінарних лічильників виконують біти РС01, РС05 паралельних інтерфейсів.

Вимірювання періоду в сусідніх інтервалах здійснюється апаратно-програмно. Операції квантування, лічби і попереднього зберігання вимірювальної інформації N[00—15] здійснюються апаратно, а процедура передачі та запам'ятовування за допомогою програмного драйвера [1]. Конструктивно об'єкт вимірювання, муфта спряження та сенсор розташовані на випробувальному стенді, а вторинний вимірювальний пристрій реалізовано у вигляді друкованої плати (180x110x10), яку розміщують у вільному «слоті» комп'ютера.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка: Навч. посібник / В. О. Поджаренко, В. В. Кухарчук. — К.: УМК ВО, 1991. — 240 с.

2. Тун А. Я. Системы контроля скорости электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 168 с.

3. Левитский Н. И. Колебания в механизмах. — М.: Наука, 1988. — 336 с.

4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. — М.: Высш. шк., 1987. — 248 с.

5. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с персональными компьютерами IBM PC /Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. — М.: Мир, 1992.

Кафедра автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки