

## ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ ФОРМИ МОДУЛЯТОРА ТАХОМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Докт. техн. наук, проф. Поджаренко В.О.,  
докт. техн. наук, доц. Михалевич В.М., асп. Кулаков П.І.

В теперішній час найбільшого розповсюдження набули фотоелектричні частотні тахометричні перетворювачі, частота вихідних імпульсів яких прямо пропорційна кутовій швидкості. Миттєва кутова швидкість визначається як величина зворотно пропорційна часовому інтервалу між двома імпульсами та уявляє собою дискретну функцію часу із змінним кроком, який залежить від вхідної величини. При низьких значеннях кутової швидкості та при обертанні валу досліджуємого приводу з кутовим прискоренням похибка первинного перетворення значно зростає [ 1 ].

Для вимірювання миттєвої кутової швидкості часто використовують тахогенератори. Найбільш точно перетворення кутової швидкості в напругу здійснюють тахогенератори постійного струму, але їх використання обмежено за рядом причин. Залежність вихідної напруги тахогенератора постійного струму від кутової швидкості описується виразом [2] :

$$U = \frac{k_E \omega - U_{\text{щ}}}{1 + (k k_p \omega + R_{\text{я}}) / R_{\text{нав}}}, \quad (1)$$

де  $U$  - вихідна напруга тахогенератора,  $U_{\text{щ}}$  - напруга на щітковому контакті,  $\omega$  - кутова швидкість,  $k_E$  - постійна машини,  $k$  - конструктивний коефіцієнт,  $k_p$  - коефіцієнт пропорційності між струмом якоря та потоком,  $R_{\text{я}}$  - опір обмотки якорю,  $R_{\text{нав}}$  - опір навантаження. Із аналізу виразу (1) випливає, що вихідна напруга тахогенератора нелінійно залежить від кутової швидкості і при нульовій кутовій швидкості не дорівнює нулю, тобто присутня зона нечутливості. Окрім того вихідна напруга тахогенератора постійного струму має пульсуючу складову, яка обумовлює виникнення додаткової похибки первинного перетворення.

Найбільш перспективними для вимірювання миттєвої кутової швидкості є фотоелектричні перетворювачі з безперервним вихідним сигналом. У роботі [ 3 ] описано такий перетворювач, у якому використовуються лінійні фотоприймачі, вихідна напруга яких прямо пропорційна світловому потоку. Прорізі модулятора та діафрагма мають таку форму, що площа отвору, через який світловий потік попадає на фоточутливий

шар фотоприймачів, лінійно залежить від кута повороту модулятора в межах кутової ширини однієї прорізи, внаслідок чого вихідна напруга кожного фотоприймача лінійно залежить від кута повороту модулятора. На виході перетворювача формується сигнал, крутизна фронтів якого прямо пропорційна кутовій швидкості. Вихідний сигнал перетворюється у цифровий код, який передається у зовнішню ЕОМ для подальшої обробки. Миттєва кутова швидкість визначається як відношення різниці двох сусідніх кодів до часу між їх отриманням. Частота вихідного сигналу дорівнює добутку кількості прорізів модулятора на частоту обертання. Оскільки смуга пропускання лінійних фотоприймачів обмежена, то при певній частоті обертання похибка первинного перетворення, що обумовлена частотними властивостями фотоприймачів, значно збільшується. Очевидно, що зменшивши частоту вихідного сигналу такого перетворювача можна покращити його частотні властивості.

У запропонованій роботі визначається форма прорізи модулятора та наводиться рівняння перетворення первинного тахометричного перетворювача, на виході якого за один оберт валу формується тільки один імпульс пилоподібної форми, за рахунок чого зменшується частота вихідного сигналу та покращуються частотні властивості перетворювача.

### Визначення форми прорізи модулятора

Завдання визначення форми прорізи модулятора полягає у знаходженні такої її форми, щоб площа отвору, через який світло попадає на фоточутливий шар фотодіоду лінійного фотоприймача, лінійно залежала від кута повороту модулятора в межах одного його оберту.

Розглянемо рис., на якому наведено креслення модулятора, з виконаною в ньому прорізу.

Форма прорізи модулятора обмежена кривими, рівняння яких у полярних координатах, полюс яких співпадає з центром модулятора  $O$ , мають вигляд :

$$\rho_1 = R_o, \quad (2)$$

$$\rho_2 = R_o + y(\varphi). \quad (3)$$

Рівняння кривої  $\rho_1 = R_o$  є рівнянням кола у полярних координатах. Вибір такої кривої обумовлено тим, що її легко виконати. Виходячи з тих самих умов, конфігурація діафрагми обмежена двома променями, які починаються у полюсі  $O$  і утворюють між собою кут  $\beta$ .

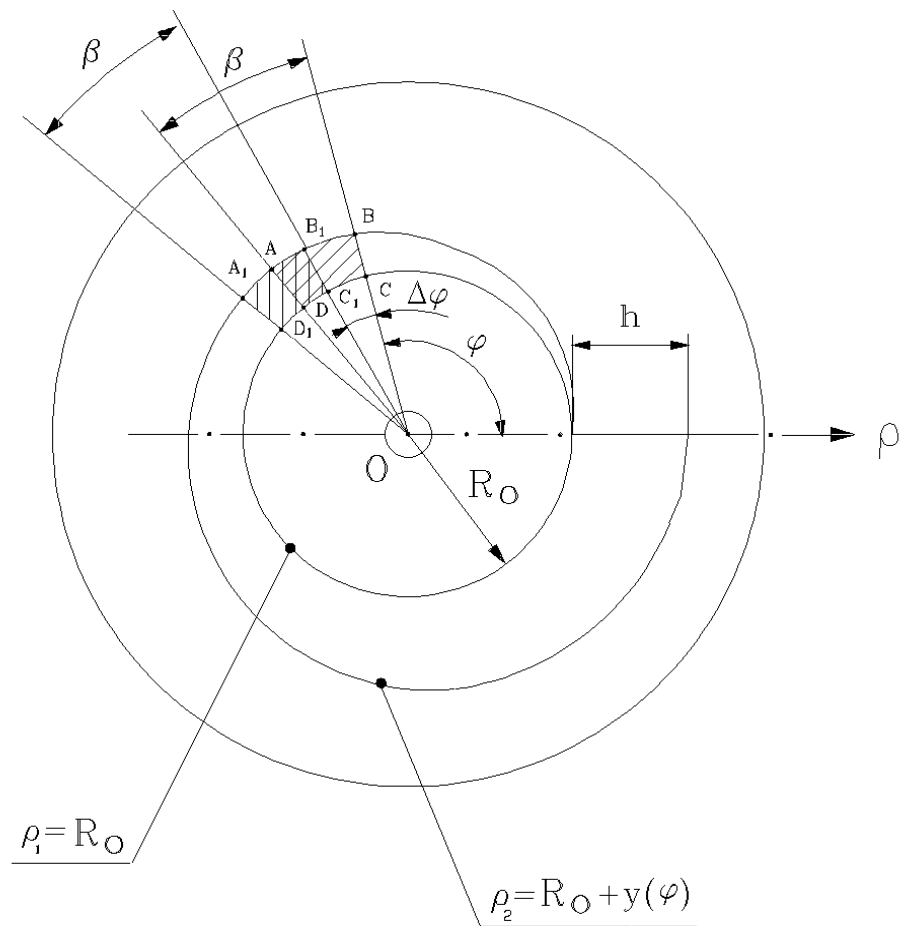


Рис. Модулятор первинного тахометричного перетворювача

Розглянемо поточне розташування діафрагми відносно смуги, що обмежена колом  $\rho_1 = R_o$  та лінією  $\rho_2 = R_o + y(\varphi)$ . Коефіцієнт заповнення  $\xi$  вікна діафрагми дорівнює відношенню

$$\xi = \frac{S_{ABCD}}{S_{MAX}}, \quad (4)$$

де  $S_{ABCD}$ ,  $S_{MAX}$  - площа фігури ABCD відповідно у поточному та кінцевому положенні (у кінцевому положенні промінь OA співпадає з полярною віссю  $\rho$ ).

Завдання полягає у визначенні рівняння кривої  $\rho_2 = R_o + y(\varphi)$ , яке забезпечує лінійну зміну приросту  $\Delta \xi$  коефіцієнта заповнення вікна діафрагми  $\xi$  в залежності від кута повороту  $\Delta \varphi$ :

$$\Delta \xi = k \Delta \varphi, \quad (5)$$

де  $k$  - коефіцієнт пропорційності.

Невідома функція  $y(\varphi)$  повинна задовольняти граничні умови:

$$y(0) = 0, \quad (6)$$

$$y(2\pi) = h. \quad (7)$$

Площу фігури ABCD знайдемо за допомогою подвійного інтегралу :

$$S_{ABCD} = \iint_{ABCD} \rho d\varphi d\rho = \frac{1}{2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + \beta} (2R_0 y(\varphi) + y^2(\varphi)) d\varphi. \quad (8)$$

Аналогічно визначаємо площу фігури A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>D<sub>1</sub> :

$$S_{A_1B_1C_1D_1} = \frac{1}{2} \int_{\varphi_0 + \Delta\varphi}^{\varphi_0 + \Delta\varphi + \beta} (2R_0 y(\varphi) + y^2(\varphi)) d\varphi. \quad (9)$$

Приріст коефіцієнта заповнення  $\Delta\xi$ , що відповідає куту повороту  $\Delta\varphi$ , дорівнює:

$$\Delta\xi = \frac{\Delta S}{S_{MAX}} = \frac{S_{A_1B_1C_1D_1} - S_{ABCD}}{S_{MAX}}. \quad (10)$$

Звідки, з урахуванням (4), (8), (9), дістаємо :

$$\int_{\varphi_0 + \Delta\varphi}^{\varphi_0 + \Delta\varphi + \beta} (2R_0 y(\varphi) + y^2(\varphi)) d\varphi - \int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + \beta} (2R_0 y(\varphi) + y^2(\varphi)) d\varphi = k_1 \Delta\varphi. \quad (11)$$

де  $k_1 = 2kS_{MAX}$ .

Продиференціюємо співвідношення (11) за  $\Delta\varphi$ , тоді

$$k_1 = 2R_0 y(\varphi_0 + \Delta\varphi + \beta) + y^2(\varphi_0 + \Delta\varphi + \beta) - 2R_0 y(\varphi_0 + \Delta\varphi) - y^2(\varphi_0 + \Delta\varphi). \quad (12)$$

Введемо позначення :

$$\varphi_0 + \Delta\varphi = t; \quad z(t) = 2R_0 y(t) + y^2(t). \quad (13)$$

При цьому співвідношення (12) приймає вигляд :

$$z(t + \beta) - z(t) = k_1. \quad (14)$$

Нехай  $t=0$ , тоді відповідно з (6), (13), маємо  $z(0)=0$  та відповідно з (14),  $z(\beta)=k_1$ .

При  $t=\beta$ , відповідно з (14),  $z(2\beta)=k_1+z(\beta)=2k_1$ .

Аналогічно, прийнявши  $t=2\beta$ , отримаємо  $z(3\beta)=3k_1$ .

Отже, для значень аргументів  $\beta, 2\beta, 3\beta$ , які є членами арифметичної прогресії, функція  $z(t)$  приймає значення  $k_1, 2k_1, 3k_1$ , які також утворюють арифметичну прогресію. Наведена властивість притамана тільки лінійній функції  $z(t) = at + b$ . З урахуванням (5) та (13),  $b=0$ , отже  $z(t) = at$ , тобто

$$2R_0 y(t) + y^2(t) = at. \quad (15)$$

Переписавши останнє співвідношення у вигляді

$$(y(t) + R_0)^2 = R_0^2 + at, \quad (16)$$

з урахуванням прийнятих позначень (13), дістанемо шукану залежність

$$\rho_2(\varphi) = \sqrt{R_0^2 + a\varphi}. \quad (17)$$

З (13) та (15) маємо  $z(t)=at$ , а з (14), з урахуванням  $z(t+\beta)=a(t+\beta)$ , встановлюємо залежність

$$a\beta = k_1 = 2kS_{MAX}, \quad (18)$$

де

$$S_{MAX} = \frac{1}{2} \int_{2\pi-\beta}^{2\pi} (\rho_2^2(\varphi) - R_0^2) d\varphi = a \frac{\beta}{4} (4\pi - \beta). \quad (19)$$

Для початкового положення (промінь ОВ співпадає з полярною віссю) маємо

$$S_0 = \frac{1}{2} \int_0^\beta (\rho_2^2(\varphi) - R_0^2) d\varphi = a \frac{\beta^2}{4}, \quad (20)$$

звідки знаходимо значення  $\xi_0$

$$\xi_0 = \frac{S_0}{S_{MAX}} = \frac{\beta}{4\pi - \beta}. \quad (21)$$

При переході вікна діафрагми з початкового в кінцеве положення коефіцієнт заповнення  $\xi$  збільшується від  $\xi_0$  до 1, або, що теж саме, на величину прямо пропорційну куту повороту.

Співвідношення (17) задовольняє очевидній умові  $\rho_2(0) = R_0$ , а з умови  $\rho_2(2\pi) = R_0 + h$ , встановлюється ще одне співвідношення :

$$a = \frac{h(2R_0 + h)}{2\pi}, \quad (22)$$

яке дозволяє вибрати конкретні числові значення параметрів.

### Рівняння перетворення

Розглянемо, як залежить вихідна напруга первинного тахометричного перетворювача від кута повороту модулятора. Для цього спочатку розглянемо, як залежить площа отвору, через який світло попадає на фоточутливий шар фотодіода, від кута повороту модулятора.

В діапазоні значень кута повороту  $\varphi \in [0, 2\pi - \beta]$  променя ОВ відносно полярної вісі  $\rho$  ця залежність описується виразом :

$$S(\varphi) = \frac{1}{2} \int_\varphi^{\varphi+\beta} (\rho_2^2(\varphi) - R_0^2) d\varphi = a \frac{\beta}{2} \varphi + a \frac{\beta^2}{4}. \quad (23)$$

В діапазоні значень кута повороту  $\varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi]$  :

$$\begin{aligned}
S(\varphi) &= \frac{1}{2} \int_{\varphi}^{2\pi} (\rho_2^2(\varphi) - R_0^2) d\varphi + \frac{1}{2} \int_0^{\varphi - (2\pi - \beta)} (\rho_2^2(\varphi) - R_0^2) d\varphi = \\
&= -\frac{a(2\pi - \beta)}{2} \varphi + \frac{a(2\pi - \beta)^2}{4} + a\pi^2
\end{aligned} \tag{24}$$

У відповідності з [4] вихідна напруга лінійного фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний описується виразом

$$U_{\Phi} = S_I R \frac{I}{l^2} S, \tag{25}$$

де  $I$  - сила світла;  $l$  - відстань від джерела світла до освітлюємої поверхні;  $S$  - площа, що облучається;  $U_{\Phi}$  - вихідна напруга лінійного фотоприймача,  $S_I$  - інтегральна струмова чутливість фотодіоду;  $R$  - опір резистору у колі зворотнього зв'язку операційного підсилювача.

Підставивши (23) та (24) в (25) отримуємо рівняння для вихідної напруги тахометричного перетворювача в залежності від куту повороту :

$$U_{\Phi} = \begin{cases} S_I R \frac{I}{l^2} a \frac{\beta}{2} \varphi + S_I R \frac{I}{l^2} a \frac{\beta^2}{4}, \varphi \in [0, 2\pi - \beta] \\ -S_I R \frac{I}{l^2} \frac{a(2\pi - \beta)}{2} \varphi + S_I R \frac{I}{l^2} \frac{a(2\pi - \beta)^2}{4} + S_I R \frac{I}{l^2} a\pi^2, \varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi] \end{cases} \tag{26}$$

Кутова швидкість та кут повороту зв'язані між собою співвідношенням :

$$\varphi(t) = \int \omega(t) dt, \tag{27}$$

де  $\omega(t)$  - кутова швидкість в залежності від часу;  $\varphi(t)$  - кут повороту в залежності від часу.

Підставивши (27) в (26) отримуємо рівняння перетворення

$$U_{\Phi} = \begin{cases} S_I R \frac{I}{l^2} a \frac{\beta}{2} \int \omega(t) dt + S_I R \frac{I}{l^2} a \frac{\beta^2}{4}, \varphi \in [0, 2\pi - \beta] \\ -S_I R \frac{I}{l^2} \frac{a(2\pi - \beta)}{2} \int \omega(t) dt + S_I R \frac{I}{l^2} \frac{a(2\pi - \beta)^2}{4} + S_I R \frac{I}{l^2} a\pi^2, \varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi] \end{cases} \tag{28}$$

Продиференціювавши вираз (28) та провівши нескладні перетворення отримуємо рівняння, яке зв'язує між собою вихідну напругу та кутову швидкість :

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{2I^2}{S_I R a I \beta} \frac{dU_{\Phi}}{dt}, \varphi \in [0, 2\pi - \beta] \\ -\frac{2I^2}{S_I R a I (2\pi - \beta)} \frac{dU_{\Phi}}{dt}, \varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi] \end{cases} \tag{29}$$

Із виразу (29) випливає, що миттєва кутова швидкість прямо пропорційна вихідній напрузі тахометричного перетворювача в будь-який момент часу.

## Висновки

Завдяки використанню визначеної форми прорізи модулятора тахометричного перетворювача, на його виході формується один імпульс пилоподібної форми за один оберт валу досліджуємого електроприводу, крутизна переднього фронту якого прямо пропорційна миттєвій кутовій швидкості. Це дозволяє значно покращити частотні властивості у порівнянні з відомими аналогами.

Шляхом диференціювання вихідного сигналу тахометричного перетворювача можна визначити значення миттєвої кутової швидкості в будь-який момент часу.

Кутова ширина прорізи діафрагми  $\beta$  вибирається такою, щоб втратою вимірювальної інформації під час дії заднього фронту вихідної напруги тахометричного перетворювача можна було знехтувати. Хоч цей фронт є також інформативним, його обробка вимагає значного ускладнення структури та алгоритму роботи вимірювального каналу.

Доцільно використання тахометричного перетворювача з вищенаведеною прорізою модулятора у складі комп'ютерної вимірювальної системи для дослідження динамічних характеристик приводів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации / В.А. Поджаренко, А.Д. Азаров, В.А. Власенко, И.И. Коваленко — К.: Выща шк., 1990. — 208 с.
2. Армeнский Е.В., Фалк Г.Б. Электрические микромашины: Учеб. пособие для студ. электротехн. спец. вузов.- 3-е изд., перераб. и доп.-М.: Высш. шк., 1985. -231 с., ил.
3. Кулаков П.И., Поджаренко В.А. “Датчик угловой скорости и углового ускорения” / Proceeding of the second international scientific and technical conference “Unconventional electromechanical and electrotechnical systems”, volume 2, p. 489-494. Schecin, Poland, 1996
4. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л., Смолин О.В., . Микроэлектронные фотоприемные устройства. - М.: Энергоатомиздат, 1984. — 208 с.

Кафедра метрології та промислової автоматики