

ЦИФРОВИЙ ТАХОМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ІЗ ЗМІННОЮ РОЗРІЗНЮВАЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ

Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Поджаренко А.В.

Вінницький державний технічний університет, кафедра «Метрології та промислової
автоматики», Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, 287100, Україна

Анотація. У статті описується цифровий тахометричний перетворювач, у якому розрізнявальна здатність по куту повороту, з метою мінімізації похибки вимірювання, змінюється зовнішньою напругою у відповідності із кутовою швидкістю, що вимірюється. Розглянуто конструкцію перетворювача, принцип дії, здійснено аналіз похибок.

Аннотация. В статье описывается цифровой тахометрический преобразователь, в котором разрешающая способность по углу поворота, с целью минимизации погрешности измерения, изменяется внешним напряжением в соответствии с измеряемой угловой скоростью. Рассмотрена конструкция преобразователя, принцип работы, осуществлен анализ погрешностей.

Abstract. In the article is described digital the tachometer converter, in which the resolution on a corner of turn, with the purpose of minimization of an error of measurement, changes by an external voltage according to measuring of angular speed. The design of the converter, principle of work is considered, the analysis of errors is carried out.

ВСТУП

Для більшості електродвигунів, які працюють у різноманітних пристроях автоматики, системах точних електроприводів, побутових пристроях, динамічний режим є основним режимом їх роботи. Велике значення, особливо для апаратури відео та звукозапису, має високоточне вимірювання відхилень кутової швидкості електродвигуна від номінального значення. Широке застосування математичних моделей електродвигунів обумовлює необхідність перевірки їх адекватності, а це краще за все робити шляхом порівняння

розрахункової динамічної характеристики з експериментальною. В останній час з'явилося багато наукових праць, що присвячені ідентифікації параметрів електродвигунів за їх математичними моделями, що дозволяє значно скоротити час їх випробувань. Використовуємі при цьому алгоритми обумовлюють необхідність високоточного вимірювання динамічних характеристик.

Однак завдання високоточного вимірювання кутової швидкості в динамічному режимі, яка є однією з найбільш інформативних характеристик електродвигуна, ще не вирішено і є актуальним.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Принцип роботи цифрових тахометрів полягає у визначенні відношення $\omega_{\text{СЕР}} = \frac{\alpha_0}{t_B}$, де

α_0, t_B – відповідно кут та час повороту первинного тахометричного перетворювача, який встановлено на валу досліджуємого приводу; $\omega_{\text{СЕР}}$ - середнє за час t_B значення кутової швидкості. В залежності від того, який з вище вказаних параметрів вимірюється, можливі два алгоритми роботи тахометра: визначення кута повороту за фіксований інтервал часу; визначення часу повороту на фіксований кут. Тахометри, які працюють за першим алгоритмом призначені для статичних вимірювань [1]. В другому випадку здійснюється вимірювання часу повороту первинного тахометричного перетворювача (ПТП) на фіксований кут, тобто вимірюється період сигналу ПТП шляхом заповнення його імпульсами зразкового генератора. Працює такий тахометр циклічно, в кінці кожного періоду вимірюва-

льна інформація запам'ятовується у зовнішньому обчислюючому пристрою для подальшої обробки. Кутова швидкість визначається як

$$\omega_{\text{СЕР}} = \omega(t) + \varepsilon(t) \frac{t_{\text{В}}}{2} = \frac{2\pi f_0}{zN}, \quad (1)$$

де $\omega(t)$, $\varepsilon(t)$ - відповідно кутова швидкість та прискорення в час t ; f_0 - частота опорного генератора; N - число імпульсів зразкового генератора; z - кількість штрихів модулятора ПТП.

У роботі [2] доведено, що для кожного значення вимірюємої кутової швидкості, при роботі тахометра в режимі вимірювання періоду та при обертанні валу досліджуемого електродвигуна з кутовим прискоренням (тобто в динамічному режимі), є таке число штрихів модулятора, при якому результуюча середньоквадратична похибка вимірювання мінімальна. З вище сказаного слідує, що змінюючи розрізнявальну здатність ПТП по куту повороту у відповідності з кутовою швидкістю, можна мінімізувати похибку вимірювання. Промислово виготовляемі ПТП мають фіксовану кількість штрихів, яку можна змінювати

тільки алгоритмічно та ступеньково. Тому актуальне завдання розробки тахометричного перетворювача, у якому можливо управління його розрізнявальною здатністю.

ПРИНЦИП РОБОТИ ПТП ІЗ ЗМІННОЮ РОЗРІЗНЮВАЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ

Розглянемо рис.1, на якому наведено схематичне креслення ПТП із змінною розрізнявальною здатністю. ПТП має вал 1, який за допомогою муфти з'єднується з валом досліджуемого електродвигуна. На вал насаджено модулятор 2, за яким знаходиться діафрагма 3. За діафрагмою знаходяться два фотоприймача 4 та 5 (вони також позначені відповідно F2 та F1), які розташовані на платі 6, на якій знаходяться і інші електронні компоненти ПТП. Діафрагма має прорізи 7 та 8, кутова ширина яких відносно центру модулятора β . Модулятор має дві прорізи - 9 та 10. Прорізь 9 має таку ж форму і розташована на такій же відстані від центру модулятора, як і прорізь 8 діафрагми. Форма прорізі 10 обмежена двома кривими $\rho_1(\varphi)$ та $\rho_2(\varphi)$, вирази для яких у полярних

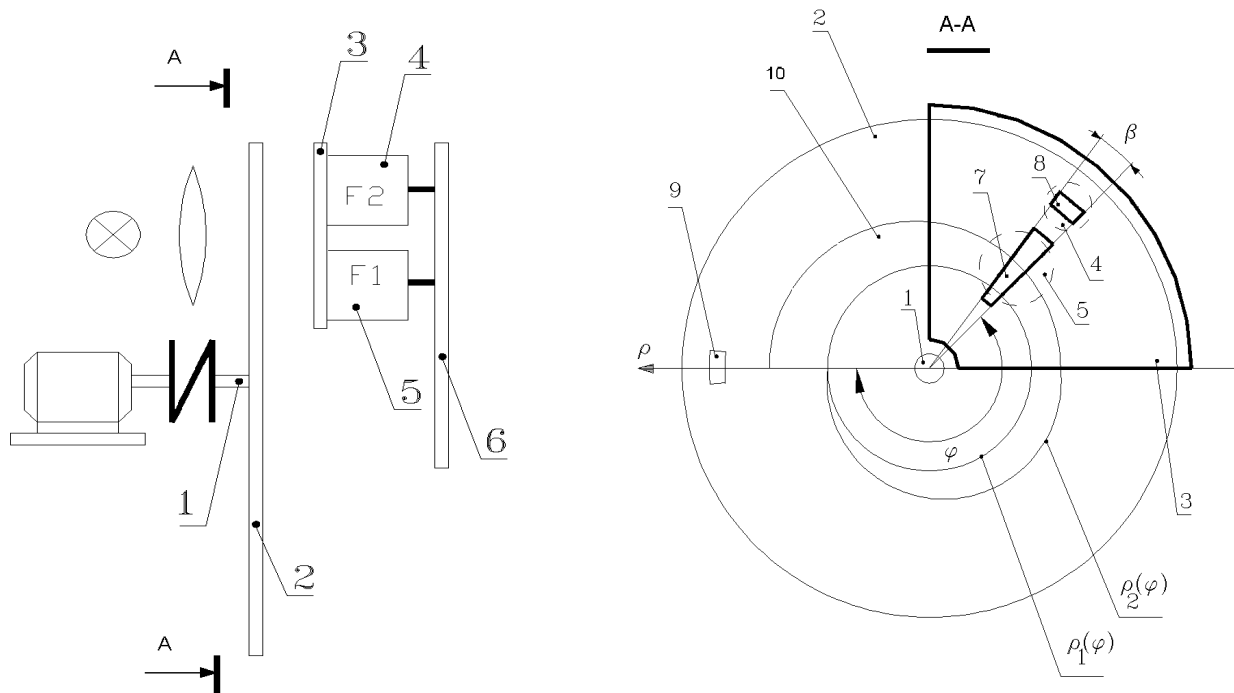


Рис.1. Схематичне креслення ПТП із змінною розрізнявальною здатністю

координатах відносно вісі ρ з полюсом, який співпадає з центром модулятора:

$$\rho_1(\varphi) = R_0 \quad (2)$$

$$\rho_2(\varphi) = \sqrt{R_0^2 + a\varphi}, \quad (3)$$

де a - постійний коефіцієнт; φ - кутова координата; R_0 - радіус кола $\rho_1(\varphi)$.

Фотоприймач F1, який лінійно перетворює світловий потік в напругу, реалізовано на основі пари фотодіод-операційний підсилювач [3]. Фотоприймач F2 реалізовано так, що при засвітці фотодіоду на виході формується рівень логічної одиниці, при затемненні - рівень логічного нуля. Фоточутливий шар фотодіодів освітлюється джерелом світла через отвір, який утворюється перекриттям прорізів модулятора та діафрагми. При використанні джерела світла з конденсорною лінзою, вихідна напруга фотоприймача F1 з площею освітлюемого фоточутливого шару зв'язана співвідношенням

$$U_{F1} = S_I R \frac{I}{l^2} S, \quad (4)$$

S_I - струмова чутливість фотодіоду; R - опір в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача; S - освітлюєма площа фоточутливого шару фотодіоду; l - відстань від джерела світла до фоточутливого шару фотодіоду; I - сила світла.

При обертанні валу, при вищевказаній формі модулятора та діафрагми, залежність вихідної напруги

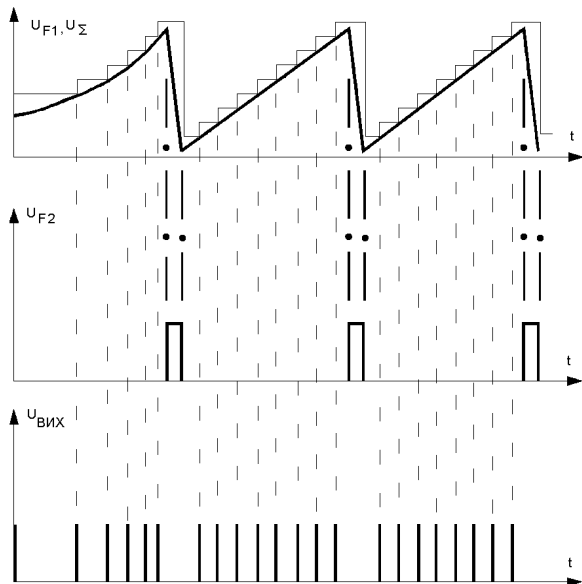


Рис. 2. Часові діаграми роботи ПТП.

Далі цифровий код подається на вхід цифро-аналогового перетворювача (ЦАП), з виходу якого напруга поступає на вхід суматора напруг, на другий

вхід фотоприймача F1 від кута повороту валу описується виразом

$$U_{F1} = \begin{cases} S_I R \frac{I}{l^2} \left(a \frac{\beta}{2} \varphi + a \frac{\beta^2}{4} \right), & \varphi \in [0, 2\pi - \beta] \\ S_I R \frac{I}{l^2} \left(-\frac{a(2\pi - \beta)}{2} \varphi + \frac{a(2\pi - \beta)^2}{4} + a\pi^2 \right), & \varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi] \end{cases} \quad (5)$$

Ця напруга має пилоподібний вигляд та зображена на рис. 2. Тривалість заднього фронту напруги, який формується при $\varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi]$, визначається кутовою шириною прорізи діафрагми β . Величина кута β вибирається настільки малою, що втрачено вимірювальної інформації можна знехтувати.

На рис. 3 наведено функціональну схему розглядаемого ПТП. Перед початком вимірювання, модулятор випадково розташовується відносно діафрагми, тобто вихідна напруга фотоприймача F1 відрізняється від свого мінімального значення. Зовнішній імпульс запуску ПТП поступає на вхід логічного елементу АБО D3, запускає аналого-цифровий перетворювач (АЦП) D2 та скидає лічильник імпульсів D4. Цей імпульс через елемент АБО D6 поступає на вихід ПТП і є першим вихідним імпульсом. По закінченню аналого-цифрового перетворення на виході сигналу готовності RE АЦП з'являється імпульс, за переднім фронтом якого цифровий код, відповідний вихідній напрузі фотоприймача, записується у лічильник.

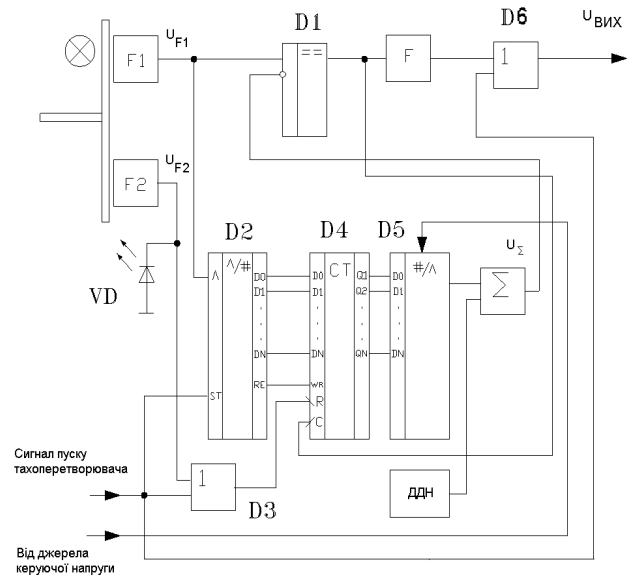


Рис. 3. Функціональна схема ПТП.

вхід якого поступає напруга від джерела додаткової напруги ДДН. Вихідна напруга ДДН дорівнює величині одного дискрету вихідної напруги ЦАП. Це необ-

хідно для того, щоб перед початком вимірювання на виході компаратора був рівень логічного нуля. Вихідна напруга ЦАП, яка за допомогою суматора складається з напругою ДДН, подається на інвертуючий вхід компаратору. Ця напруга (рис. 3) має пилоподібний вигляд та квантована за рівнем. При обертанні валу електродвигуна вихідна напруга фотоприймача F1 збільшується прямо пропорційно куту повороту. Коли її рівень перевищує напругу на інвертуючому вході компаратора, на його виході з'являється рівень логічної одиниці і цифровий код лічильника імпульсів збільшується на одиницю. Відповідно збільшується напруга на інвертуючому вході компаратора на величину одного дискрету вихідної напруги ЦАП, а на виході компаратора з'являється напруга рівня логічного нуля. На виході компаратора формується імпульс, тривалість якого

$$t_I = t_{K01} + t_L + t_{ЦАП} + t_{K10}, \quad (6)$$

t_{K01} - час переключення компаратора із стану логічного нуля в стан логічної одиниці; t_L - час спрацьовування лічильника; $t_{ЦАП}$ - час, за який вихідна напруга ЦАП перевищить вихідну напругу фотоприймача на напругу спрацьовування компаратора; t_{K10} - час переключення компаратора із стану логічної одиниці в стан логічного нуля;

Процес продовжується циклічно і на виході компаратора формується послідовність імпульсів, яка поступає на вхід формувача імпульсів F, який формує імпульси калібровані по амплітуді та тривалості. Так як вихідна напруга фотоприймача прямо пропорційна куту повороту, а вихідні імпульси компаратора формуються в моменти збільшення цієї напруги на постійну величину одного дискрету вихідної напруги ЦАП, час між двома сусідніми імпульсами є часом повороту вала досліджуемого електродвигуна на фіксований кут. Коли час повороту вала досліджуемого електродвигуна знаходиться в межах $\varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi]$, на виході фотоприймача F2 з'являється імпульс U_{F2} (рис. 3), тривалість якого визначає час дії заднього фронту напруги U_{F1} . За заднім фронтом цього імпульсу здійснюється скид лічильника. Таким чином, на протязі кожного оберту на виході ПТП формується послідовність імпульсів, частота яких пропорційна значенню кутової швидкості. Якщо перед початком вимірювання розташування модулятора відносно діафрагми відповідає $\varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi]$, вірогідність вимірювальної інформації під час першого оберту буде низька, про що буде свідчити випромінювання світлодіоду VD. В цьому випадку необхідно

змінити розташування модулятора відносно діафрагми.

Розглянемо процес зміни розрізняльної здатності ПТП. Як відомо [4], розрізняльна здатність найбільш швидкодіючих ЦАП з сумування струмів знаходиться з виразу

$$\Delta U_{P.З.} = R_{3.3.} \frac{U_{оп}}{R_c}, \quad (7)$$

$U_{оп}$ - опорна напруга ЦАП; $R_{3.3.}$ - опір кола зворотнього зв'язку операційного підсилювача, що входить до складу ЦАП; R_c - струмозадаючий резистор молодшого розряду. Позначимо через M величину

$S_I R \frac{I}{l^2}$, яка є коефіцієнтом пропорційності між площиною освітлюемого фоточутливого шару фотодіоду та вихідною напругою фотоприймача F1. Як слідує з аналізу виразу (5), діапазон зміни максимальної та мінімальної вихідної напруги фотоприймача F1 визначаються співвідношенням

$$\Delta U = U_{MAX F1} - U_{MIN F1} = M \frac{a\beta}{2} (2\pi - \beta), \quad (8)$$

де $U_{MAX F1}$, $U_{MIN F1}$ - відповідно максимальна та мінімальна вихідна напруга фотоприймача F1.

Кількість імпульсів k , формуємих за кут повороту $2\pi - \beta$, визначається як відношення ΔU до $\Delta U_{P.З.}$, а розрізняльна здатність ПТП - фіксований кут повороту вала за час між двома сусідніми імпульсами :

$$\varphi_o = \frac{2\pi - \beta}{k} = \frac{2R_{3.3.}}{Ma\beta R_c} U_{оп}, \quad (9)$$

Із виразу (9) слідує, що розрізняльна здатність ПТП прямо пропорційна опорній напрузі ЦАП. В якості джерела керуючої напруги можливе використання іншого ЦАП. Тоді розрізняльною здатністю можна керувати цифровим кодом. Сучасні ЦАП допускають зміну опорної напруги в широкому діапазоні, що обумовлює високий коефіцієнт перекриття по розрізняльній здатності.

АНАЛІЗ ПОХИБОК ТАХОМЕТРУ, ЩО ПРАЦЮЄ В РЕЖИМІ ВИМІРЮВАННЯ ПЕРІОДУ.

Для проведення аналізу використаємо методику, що застосовано у [2]. Основними складовими

похибки цифрового тахометра, що працює в режимі вимірювання періоду є :

- дискретна похибка лічильника при відсутності синхронізації між імпульсами зразкового генератору та імпульсами ПТП. Ця похибка, у відповідності з [5], має трикутний закон розподілення. Відносна середньоквадратична оцінка цієї похибки описується виразом

$$\delta_N = \frac{1}{\sqrt{6N}} = \frac{k\omega_{CEP}}{2\sqrt{6}\pi f_0}, \quad (10)$$

- похибка, що обумовлена нестабільністю частоти опорного генератору. Середньоквадратична оцінка цієї похибки у відповідності з [5] визначається як

$$\delta_F = \omega_{CEP} \frac{\varepsilon_F}{\sqrt{3}}, \quad (11)$$

ε_F - нестабільність частоти опорного генератору;

- динамічна похибка цифрового тахометру. Ця похибка залежить від кутового прискорення та суттєво впливає на загальну тільки в динамічному режимі роботи електродвигуна. Якщо виходити з того, що об'єкт дослідження працює з максимальними навантаженнями та моментами, закон розподілення цієї похибки буде близький до дискретного двумодального, а відносна середньоквадратична оцінка визначається співвідношенням [2]

$$\delta_D = \frac{\pi \varepsilon_{MAX}}{\omega_{CEP}^2 k}, \quad (12)$$

де δ_D - динамічна похибка цифрового тахометру;

ε_{MAX} - максимальне кутове прискорення досліджуемого електродвигуна.

- похибка формування вихідних імпульсів ПТП. Ця похибка визначається параметрами використовуємої елементної бази, кутовою швидкістю та кутовим прискоренням валу досліджуемого електродвигуна, муфтою спряження, технологічною неточністю виконання прорізів модулятора та діафрагми та багатьма іншими параметрами. Результуюча середньоквадратична оцінка дорівнює сумі дисперсій складових похибки з урахуванням їх коефіцієнтів кореляції. Припустимо, що така операція виконана та результуюча середньоквадратична похибка формування вихідних імпульсів дорівнює $\Delta\varphi_0$, а її відносне значення

$$\delta_I = \frac{\Delta\varphi_0 k}{2\pi}, \quad (13)$$

Результуюча середньоквадратична похибка цифрового тахометру, працюючого в режимі вимірювання періоду, з урахуванням незалежності складових, визначається виразом

$$\delta_{\omega} = \sqrt{\delta_N^2 + \delta_F^2 + \delta_D^2 + \delta_I^2} = \frac{\sqrt{\omega_{CEP}^6 k^4 + 6 f_0^2 \Delta\varphi_0^2 \omega_{CEP}^4 k^4 + 8 \pi^2 f_0^2 \varepsilon_F^2 \omega_{CEP}^6 k^2 + 24 \pi^4 \varepsilon_{MAX}^2 f_0^2}}{2\sqrt{6}\pi f_0 \omega_{CEP}^2 k} \quad (14)$$

Функція (14) має мінімум по аргументу k , який визначає оптимальну кількість імпульсів на оберт, при якій результуюча середньоквадратична похибка мінімальна.

$$k_{opt} = \frac{\pi^4 \sqrt{6} \sqrt{2 \varepsilon_{MAX} f_0}}{\omega_{CEP}^4 \sqrt{\omega_{CEP}^2 + 6 \Delta\varphi_0^2 f_0^2}}. \quad (15)$$

Відповідна розрізняювальна здатність ПТП знаходиться з співвідношення

$$\varphi_{0opt} = \frac{2\pi - \beta}{k_{opt}} = \frac{(2\pi - \beta)\omega_{CEP}^4 \sqrt{\omega_{CEP}^2 + 6 \Delta\varphi_0^2 f_0^2}}{\pi^4 \sqrt{6} \sqrt{2 \varepsilon_{MAX} f_0}}. \quad (16)$$

Графіки цих залежностей, при $f_0=1$ МГц, $\Delta\varphi_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ рад, $\varepsilon_{MAX} = 100$ рад/с², наведено на рис. 4.

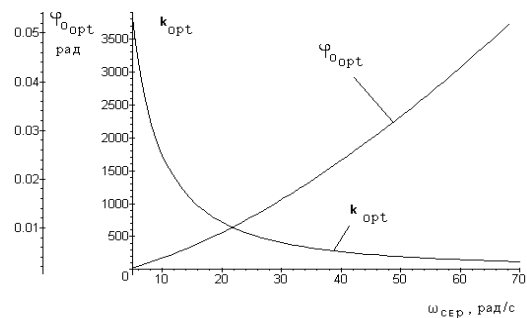


Рис.4 Залежності φ_{0opt} та k_{opt} від кутової швидкості

Підставивши (15) в (14) отримуємо вираз для мінімальної відносної похибки вимірювання в залежності від кутової швидкості.

$$\delta_{\omega MIN} = \frac{\sqrt{8\pi^2 f_0^2 \delta_F^2 \omega_{CEP}^6 + 4\sqrt{6}\pi^2 \varepsilon_{MAX} f_0 \sqrt{\omega_{CEP}^6 + 6\Delta\varphi_0^2 f_0^2 \omega_{CEP}^4}}}{2\sqrt{6}\pi f_0 \omega_{CEP}^2}. \quad (17)$$

На рис. 5 наведено графік цієї залежності, графік відносної похибки вимірювання кутової швидкості при використанні фотоелектричного частотного ПТП, з кількістю штрихів модулятора $z=1024$, графік відношення цих похибок.

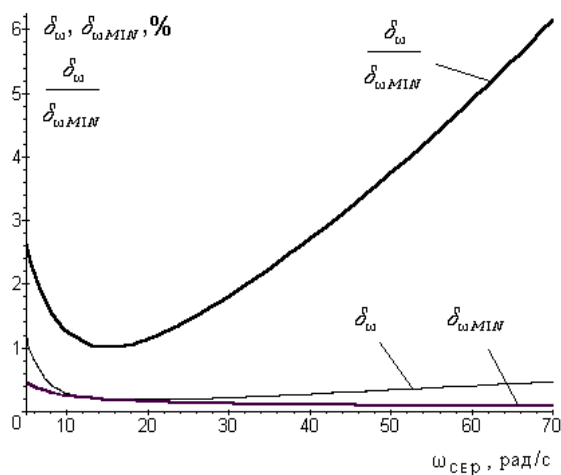


Рис. 5. Залежності δ_{ω} , $\delta_{\omega \text{ MIN}}$, $\frac{\delta_{\omega}}{\delta_{\omega \text{ MIN}}}$ від кутової швидкості

ВИСНОВКИ

Відносна похибка вимірювання кутової швидкості при обертанні валу досліджуемого електродвигуна із змінним кутовим прискоренням, при фіксованій розрізнявальній здатності значно перевищує похибку при оптимальній розрізнявальній здатності.

Для зменшення похибки вимірювання необхідно змінювати розрізнявальну здатність ПТП у відповідності з вимірюємою кутовою швидкістю. Можливе проведення вимірювань за наступними алгоритмами.

- якщо перед початком вимірювання значення вимірюємої кутової швидкості попереднє відоме, необхідно встановити відповідну оптимальну розрізнявальну здатність;

- якщо значення кутової швидкості невідоме, проводиться попереднє вимірювання, виходячи з результатів якого встановлюється відповідна оптимальна розрізнявальна здатність та проводиться повторне вимірювання;

- при вимірюванні залежності кутової швидкості від часу проводиться попереднє вимірювання, під час якого встановлюється характер зміни кутової швидкості. Після цього проводиться повторне вимірювання, під час якого розрізнявальна здатність змінюється у відповідності із зміною кутової швидкості. Це потребує запам'ятовування у зовнішньому обчис-

люючому пристрої значень розрізнявальної здатності у відповідні моменти часу.

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. В.В. Андрущук. Анализ погрешностей цифровых тахометров. // «Измерительная техника», №7, 1979.
3. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л., Смолин О.В., Микроэлектронные фотоприемные устройства. - М.: Энергоатомиздат, 1984. — 208 с.
4. Зубчук В.И. и др. Справочник по цифровой схемотехнике.-К.: Техника, 1990.-448 с.
5. П.П. Орнатский. Теоретические основы информационно-измерительной техники. Издательское объединение «Вища школа», 1976.- с. 432.