

К.І. Снітков, Ю.В. Шабатура

МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ІНДУКЦІЙНИХ ДАВАЧІВ

У роботі виконано дослідження нового методу зменшення похибки визначення кутових переміщень за допомогою індукційного давача, його математичне забезпечення та експериментальна перевірка. Представлений метод базується на вимірюванні кута зсуву фаз сигналів давача, визначення якого здійснюється за допомогою співставлення оцифрованих значень сигналів давача із круговою дискретною згорткою та подальшим визначенням їх ортогональних складових. На основі значень отриманих ортогональних складових здійснюється визначення кута за допомогою цифрового детектору фази, в основі роботи якого лежить застосування програмного компаратору та обернених тригонометричних функцій. Запропонований метод не вимагає використання демодуляторів, лічильника та таблиць квадрантів, які асоціюються із традиційними методами визначення кута зсуву фаз сигналів. Представлений метод може бути використаний для вимірювання кутів у діапазоні $0-2\pi$, є простим, і може бути легко реалізований за допомогою цифрових засобів. Бібл. 9, табл. 3, рис. 16.

Ключові слова: кутові переміщення, математичний метод, індукційний давач, обертовий трансформатор, кругова дискретна згортка, ортогональні складові, прецизійність, зсув фази.

В работе выполнено исследование нового метода уменьшения погрешности определения угловых перемещений с помощью индукционного датчика, его математическое обеспечение и экспериментальная проверка. Представленный метод основан на измерении угла сдвига фаз сигналов датчика, определение которого осуществляется с помощью сопоставления оцифрованных значений сигналов датчика с круговой дискретной сверткой и последующим определением их ортогональных составляющих. На основе значений полученных ортогональных составляющих осуществляется определение угла с помощью цифрового детектора фазы, в основе работы которого лежит применение программного компаратора и обратных тригонометрических функций. Предложенный метод не требует использования демодуляторов, счетчика и таблиц квадрантов, которые ассоциируются с традиционными методами определения угла сдвига фаз сигналов. Представленный метод может быть использован для измерения углов в диапазоне $0-2\pi$, является простым, и может быть легко реализован с помощью цифровых средств. Библи. 9, табл. 3, рис. 16.

Ключевые слова: угловые перемещения, математический метод, индукционный датчик, вращающийся трансформатор, круговая дискретная свертка, ортогональные составляющие, точность, сдвиг фазы.

Вступ. На сьогоднішній день у багатьох галузях науки і техніки у якості пристроїв, які надають інформацію про поточний стан виконавчих механізмів, широко використовуються куто-вимірювальні системи. У більшості випадків, особливо для пристроїв і механізмів, які працюють в екстремальних умовах, використовуються електромеханічні давачі (давачі кута), робота яких спрямована на перетворення кутових переміщень в інформаційний сигнал.

Як відомо з [1] для визначення кутових переміщень існує велика кількість видів давачів, таких як: оптичний енкодер, гіроскопічні давачі, магнітний енкодер, а також індукційні давачі. Однак застосування вище зазначених типів давачів в кутовимірювальних системах повинні використовуватися із врахуванням призначення таких систем, умов навколишнього середовища та вимог до їх точності. Безсумнівно, що на сьогоднішній день поширеного застосування в кутовимірювальних системах та системах позиціонування здобули оптичні енкодери. Проте, незважаючи на їх широке поширення, сьогодні продовжують функціонувати системи позиціонування, у яких використовуються індукційні електромеханічні перетворювачі у якості елемента системи керування, як у галузі озброєння та військової техніки, так і в галузях промислового призначення. Використання індукційних електромеханічних перетворювачів у вище зазначених галузях пояснюється їх можливістю функціонувати у важких умовах експлуатації та невибагливістю до зовнішніх умов [2]. Однак, поряд з позитивними властивостями, у них є і недоліки – індукційні механічні перетворювачі забезпечують не достатньо високу

точність ідентифікування кутових переміщень. Зокрема – в слідкуючих системах, системах позиціонування та автоматизованих системах наведення озброєння, де такі давачі є основними сенсорами кутових переміщень. Застосування раніше зазначених давачів типу оптичний енкодер, електронний гіроскоп, з відповідною розрядністю, дозволили б здійснювати ідентифікування кутових переміщень з більш високою точністю, вимоги до яких, на сьогоднішній день, сягають десятків кутових секунд. Проте їх використання не задовольняє вище зазначені вимоги щодо умов експлуатації таких систем. Крім того, у разі модернізації кутовимірювальних систем, які функціонують на основі застосування індукційного давача, шляхом його заміни на сучасний цифровий енкодер передбачатимуться значні фінансові затрати, а також конструктивні зміни в системі.

Таким чином, враховуючи вище зазначене, виникає необхідність підвищити точність визначення кутових переміщень за допомогою індукційного давача, який застосовується в існуючих та в перспективних кутовимірювальних системах на основі застосування спеціальної математичної обробки інформаційного сигналу такого давача.

Аналіз публікацій. Сьогодні відомо багато публікацій, у яких розглянуто як апаратні так і програмні методи і засоби визначення кута повороту ротора індукційного давача, більшість з яких розглянуто в [3]. Аналіз цих публікацій дає можливість отримати знання про існуючі методи визначення кутових пере-

мішень індукційного давача, а також ознайомитися з перспективними напрямками майбутніх досліджень.

Зокрема, використання аналогових апаратних засобів (так званих фільтрів сигналу), які функціонують на основі використання R, C елементів дійсно дозволяють зменшити похибку ідентифікування кута, проте з недостатньою точністю. Причому, подальше її підвищення унеможливується за рахунок впливу дестабілізуючих факторів, таких як: температура, час, частота, які впливають як на параметри R, C елементів, так і на параметри індукційного давача кута [4]. Також, широкого розповсюдження здобули цифрові засоби, які пропонуються провідними виробниками електроніки (наприклад Texas Instruments, Freescale Semiconductor, Analog Devices), у якості готових рішень для обробки інформаційних сигналів індукційного перетворювача в основу яких покладено здійснення нескладних обчислень із використанням сучасних електронних компонентів у поєднанні із мікроконтролерною технікою [5]. Також, у роботі [6] запропоновано, новітній програмно-апаратний метод для ідентифікування кута повороту ротора індукційного давача, який базується на основі застосування фазового автопідлаштування частоти. Із використанням запропонованої схеми цього програмно-апаратного методу не виникає необхідності здійснення демодуляції сигналу, використання таблиці квадрантів, лічильників імпульсів та цифро-аналогових перетворювачів. Проте, похибка визначення кутів повороту ротора давача при використанні такого методу складає 0,3 % на повному проміжку діапазону значень 0-360°. Також в основі такого апаратно-програмного методу лежить запропонована схема, реалізація якої здійснюється на використанні простих радіоелектронних елементів, зокрема, резисторів, а отже фактор температури навколишнього середовища буде впливати на точність результатів ідентифікування.

У роботах [7, 8] представлені методи перетворення сигналів давача в кутове положення на основі застосування математичних обчислень із використанням поліному 3-го порядку [7], та генерування допоміжних синусоїдальних сигналів [8], для реалізації яких використовуються напівпровідникові компоненти та мікроконтролери. У результаті застосування таких методів досягається висока точність визначення кутових положень на високій частоті обертання валу. Проте, у вище розглянутих методах пропонується здійснювати демодуляцію синусного та косинусного сигналу для визначення кута повороту, а отже передбачається, що вал давача повинен здійснювати обертання із заданою швидкістю, яка необхідна для модуляції даних сигналів. Виходячи із вище зазначеного, застосування таких методів унеможливується в таких системах як стабілізація, позиціонування, або системи із використанням безредукторних виконавчих механізмів, де швидкість обертання вала давача наближена до нуля.

Таким чином, метою роботи є розробка спеціального математичного забезпечення для визначення кутових переміщень ротора індукційного давача на основі визначення ортогональних складових з цифрових значень сигналів давача із застосуванням кругової дискретної згортки. Також у статті здійснюється експериментальна перевірка розробленого спеціального математичного апарату для індукційних кутовимірювальних сенсорів, у яких швидкість обертання ротора наближена до нуля.

периментальна перевірка розробленого спеціального математичного апарату для індукційних кутовимірювальних сенсорів, у яких швидкість обертання ротора наближена до нуля.

В даній роботі у якості давача кута використовується індукційний давач – резольвер (обертовий трансформатор). Конструкція таких давачів є типовою і складається з двох обмоток, розміщених на статорі в одній і тій ж магнітній системі, але їх геометричні вісі розташовані взаємно перпендикулярно. Так само і обмотки ротора знаходяться в одній магнітній системі і є взаємно перпендикулярними одна до одної. Типовим способом забезпечення збудження обертового трансформатора є підключення однієї його обмотки статора до мережі живлення, а іншу обмотку замикають накоротко, або підключають до потенціометра, що реалізується в методі розглянутому в роботі [7].

Однак суть реалізації методу, запропонованого авторами цієї роботи, полягає не у вимірюванні амплітуд сигналу з подальшою її демодуляцією, а у визначенні зсуву фаз між вхідними та вихідними сигналами, що можливо здійснити при підключенні обох обмоток збудження індукційного давача до джерела живлення синусоїдальних напруг, як зображено на (рис. 1).

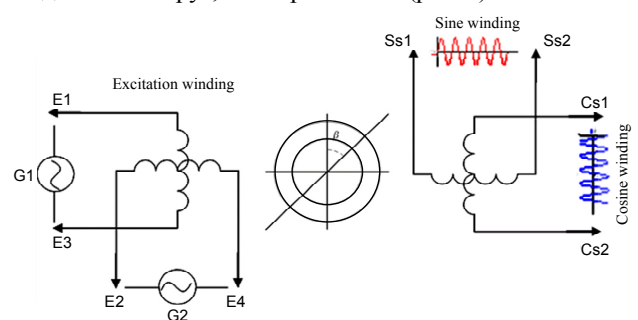


Рис. 1. Конфігурація обмоток індукційного давача

На (рис. 1) наведена схема вказаної конфігурації обмоток індукційного давача – обертового трансформатора для визначення зсуву фази вихідного сигналу в залежності від кута повороту ротору цього давача. До затискачів обмотки збудження E1-E3 та до E2-E4 відповідно подається напруга збудження G1, G2, яка рівна за амплітудою і частотою, проте зміщена одна відносно одної на 90°, що може бути описана за наступними виразами:

$$G1 = U_{fs} = A \cdot \sin(\omega t), \quad (1)$$

$$G2 = U_{fc} = A \cdot \cos(\omega t), \quad (2)$$

де A – амплітуда напруги живлення давача, ω – кутова частота сигналу збудження, t – час.

Внаслідок отримання живлення симетричним струмом в повітряному проміжку магнітної системи індукційного давача виникає обертове магнітне поле, вектор якого має постійну величину і рівномірно обертається з частотою живлення. Тоді сигнали, які формуються на затискачах Ss1-Ss2 обмотки «sine winding» та на затискачах Cs1-Cs2 обмотки «cosine winding» набувають форму синусоїдальної напруги постійної частоти, які зсунуті по фазі відносно напруги збудження давача, причому зсув фази буде визначатися кутом повороту ротора індукційного давача,

оскільки обертання вектора магнітного поля здійснюється з постійною швидкістю, тому максимумами вихідних сигналів будуть відповідати моменту часу проходження вектору магнітного поля через напрям вісі повздовжньої обмотки ротора індукційного давача. Опис сигналів на затискачах Ss1-Ss2 обмотки «sine winding» та на затискачах Cs1-Cs2 обмотки «cosine winding» можна здійснити наступними виразами:

$$U_{ss} = k \cdot A \cdot \sin(\omega t + \beta), \quad (3)$$

$$U_{cs} = k \cdot A \cdot \cos(\omega t + \beta), \quad (4)$$

де U_{ss} – значення сигналу на затискачах Ss1-Ss2 обмотки «sine winding», U_{cs} – значення сигналу на затискачах Cs1-Cs2 обмотки «cosine winding», k – коефіцієнт трансформації, β – кут повороту ротора відносно статора (іншими словами, β – кут зсуву фази сигнальної обмотки відносно обмотки збудження).

Визначення кута повороту ротора індукційного давача відносно статора здійснюється на основі застосування методу визначення ортогональних складових з масивів значень, які містять інформацію про сигнали давача із застосуванням кругової дискретної згортки, реалізацію якого можна здійснити за запропонованою спрощеною структурною схемою (рис. 2).

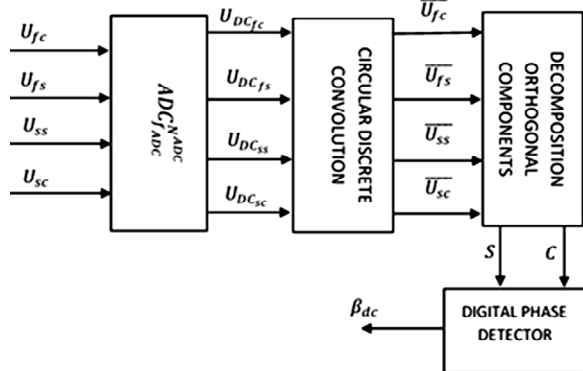


Рис. 2. Спрощена структурна схема запропонованого методу для визначення кутів переміщень індукційного давача

На рис. 2 прийняті такі позначення: U_{fs} , U_{fc} – аналогові значення сигналів, які надходять з обмотки збудження та описані виразами (1) і (2); U_{ss} та U_{sc} – аналогові значення сигналів сигнальних обмоток (3), (4); ADC (analog-to-digital converter) – m -каналний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з розрядністю N_{ADC} та частотою семплювання f_{adc} ; $U_{DC_{fc}}$, $U_{DC_{fs}}$, $U_{DC_{ss}}$, $U_{DC_{sc}}$ – цифрові значення сигналів обмоток збудження та сигналів сигнальних обмоток після проходження блоку ADC; Circular Discrete Convolution – блок формування дискретної згортки сигналу шляхом мультиплікації масивів, які сформовані на основі значень сигналів отриманих з обмоток давача із значеннями генерованих синусоїдальних сигналів; $\overline{U_{fs}}$, $\overline{U_{fc}}$, $\overline{U_{ss}}$, $\overline{U_{sc}}$ – результати формувань масивів значень кругової дискретної згортки сигналу індукційного давача у цифровому вигляді; Decomposition Orthogonal Components – блок вивільнення ортогональних складових, результатом обчислень якого є пара чисел s і c , які поступають на блок Digital Phase Detector – блок цифрового визначення

фази. Результатом обчислення у Digital Phase Detector є кут β_{dc} , який рівний куту положення ротора. Таким чином, як впливає з опису функціонування наведеної схеми, для реалізації запропонованого методу передбачається використання сучасних засобів для перетворення аналогового сигналу у цифровий код, а також застосування мікропроцесорної техніки для виконання розрахунків.

Робота запропонованої **схеми** здійснюється наступним чином: сигнали U_{fs} , U_{fc} , U_{ss} , U_{sc} , які описані виразами (1) – (4), поступають на блок $ADC_{f_{ADC}}^{N_{ADC}}$,

робота якого повинна забезпечувати перетворення значень сигналів як функцій неперервних змінних у функцію дискретних змінних у вигляді скінченної кількості відліків значень дискретної величини. Тому значення сигналів після АЦП перетворення можна описати наступними виразами:

$$U_{DC_{fci}} = A \cdot \frac{\text{trunc}(2^{N_{ADC}-1} \cdot \frac{(A + \text{rnd}(\delta) - \frac{\delta}{2}) \cdot \cos(\omega t_{si})}{A})}{2^{N_{ADC}-1}}, \quad (5)$$

$$U_{DC_{fsi}} = A \cdot \frac{\text{trunc}(2^{N_{ADC}-1} \cdot \frac{(A + \text{rnd}(\delta) - \frac{\delta}{2}) \cdot \sin(\omega t_{si})}{A})}{2^{N_{ADC}-1}}, \quad (6)$$

$$U_{DC_{ssi}} = A \cdot \frac{\text{trunc}(2^{N_{ADC}-1} \cdot \frac{(A + \text{rnd}(\delta) - \frac{\delta}{2}) \cdot \sin(\omega t_{si} + \beta)}{A})}{2^{N_{ADC}-1}}, \quad (7)$$

$$U_{DC_{sci}} = A \cdot \frac{\text{trunc}(2^{N_{ADC}-1} \cdot \frac{(A + \text{rnd}(\delta) - \frac{\delta}{2}) \cdot \cos(\omega t_{si} + \beta)}{A})}{2^{N_{ADC}-1}}, \quad (8)$$

де $U_{DC_{fci}}$, $U_{DC_{fsi}}$ – цифрові значення сигналів обмотки збудження індукційного давача, $U_{DC_{ssi}}$, $U_{DC_{sci}}$ – цифрові значення сигналів синусної обмотки та косинусної обмотки відповідно; функція trunc – функція округлення числа до цілого значення; функція rnd – програмний давач випадкових величин; δ – величина випадкових збурень, яка сягає 1 %, що відомо з проведених експериментальних досліджень [9], один із результатів такого дослідження наведено на (рис. 3); $2^{N_{ADC}-1}$ – розрядність АЦП зменшена на один розряд, який використовується для визначення полярності функції; t_{si} – період відліків сигналу, який визначається за формулою:

$$t_{si} = i \cdot T_{adc}, \quad (9)$$

де i – порядковий номер вибірки АЦП, який приймає значення від 0 до N_s ; T_{adc} – період відліку АЦП:

$$T_{adc} = \frac{1}{f_{adc}}, \quad (10)$$

$$N_s = \frac{f_{adc}}{f}, \quad (11)$$

де f_{adc} – частота відліків АЦП; f – частота збудження індукційного давача; N_s – кількість відліків АЦП.

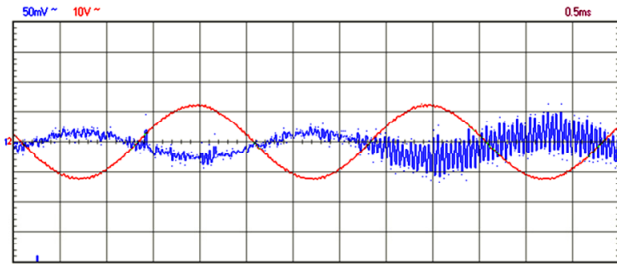


Рис. 3. Вплив випадкових збурень на амплітуду сигналу індукційного давача

Отримані масиви значень сигналів $U_{DC_{fci}}$, $U_{DC_{fsi}}$, $U_{DC_{ssi}}$, $U_{DC_{sci}}$ поступають на блок Circular Discrete Convolution, у якому формується згортка сигналу за рахунок їх мультиплікації із генерованою функцією синуса, тим самим і відбувається цифрова фільтрація сигналу. На основі цього формування згортки сигналу можна описати наступними виразами:

$$\overline{U_{fc_i}} = \sum_{j=0}^{N_s} \left[U_{DC_{fci}} \cdot U_{\sin_i} \begin{cases} i-j, & \text{if } i-j \geq 0 \\ (i-j)+N_s, & \text{otherwise} \end{cases} \right] \cdot \frac{2}{N_s}, \quad (12)$$

$$\overline{U_{fs_i}} = \sum_{j=0}^{N_s} \left[U_{DC_{fsi}} \cdot U_{\sin_i} \begin{cases} i-j, & \text{if } i-j \geq 0 \\ (i-j)+N_s, & \text{otherwise} \end{cases} \right] \cdot \frac{2}{N_s}, \quad (13)$$

$$\overline{U_{ss_i}} = \sum_{j=0}^{N_s} \left[U_{DC_{ssi}} \cdot U_{\sin_i} \begin{cases} i-j, & \text{if } i-j \geq 0 \\ (i-j)+N_s, & \text{otherwise} \end{cases} \right] \cdot \frac{2}{N_s}, \quad (14)$$

$$\overline{U_{sc_i}} = \sum_{j=0}^{N_s} \left[U_{DC_{sci}} \cdot U_{\sin_i} \begin{cases} i-j, & \text{if } i-j \geq 0 \\ (i-j)+N_s, & \text{otherwise} \end{cases} \right] \cdot \frac{2}{N_s}, \quad (15)$$

де

$$U_{\sin_i} = \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{i}{N_s}\right). \quad (16)$$

Результат графічного моделювання виразів (12) – (13) зображено на (рис. 4), а виразів (14) – (15) – на (рис. 5).

Після здійснення фільтрації через цифровий фільтр блоку Circular Discrete Convolution цифрові масиви сигналів $\overline{U_{fc_i}}$, $\overline{U_{fs_i}}$, $\overline{U_{ss_i}}$, $\overline{U_{sc_i}}$ надходять на блок Decomposition Orthogonal Components, де відбувається їх розкладання на ортогональні складові у вигляді пари чисел S і C , що по суті є координатами вектора у Декартовій системі координат:

$$S = \sum_{i=0}^{N_s-1} \left(\overline{U_{ss_i}} \cdot \overline{U_{fs_i}} + \overline{U_{sn_i}} \cdot \overline{U_{fn_i}} \right), \quad (17)$$

$$C = \sum_{i=0}^{N_s-1} \left(\overline{U_{ss_i}} \cdot \overline{U_{fc_i}} - \overline{U_{sn_i}} \cdot \overline{U_{fs_i}} \right), \quad (18)$$

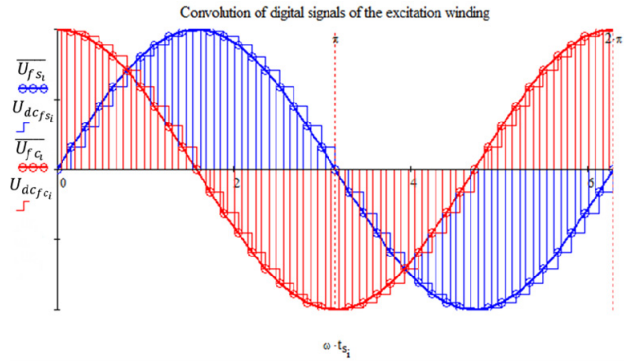


Рис. 4. Графічне представлення кругової дискретної згортки цифрових сигналів обмотки збудження індукційного давача

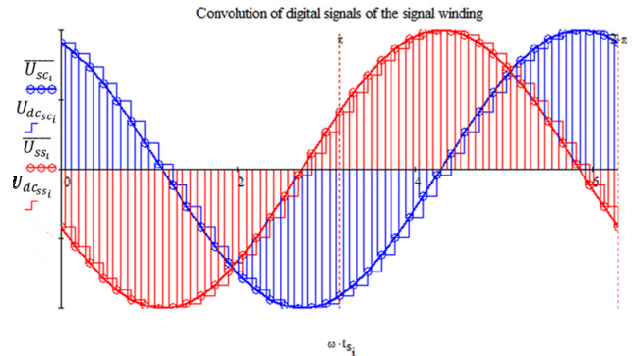


Рис. 5. Графічне представлення кругової дискретної згортки цифрових сигналів сигнальних обмоток індукційного давача

Для визначення зсуву фази сигналу, а отже і кута повороту ротора відносно статора давача, значення ортогональних складових S і C надходять до блоку Digital Phase Detector, який здійснює перетворення координат вектора в кутове значення положення ротора в реальному часі, за алгоритмом, який зображено на рис. 6.

На основі виразів (1) – (18) було проведено комп'ютерне моделювання з використанням значень параметрів реальних АЦП та індукційного давача, які зазначені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри АЦП та індукційного давача		
Параметр	Значення	Одиниці виміру
АЦП		
Розрядність	2^{16}	Bit
Частота відліків	$10 \cdot 10^3$	Hz
Індукційний давач		
Амплітуда напруги збудження	12	V
Частота напруги збудження	400	Hz

Результати зазначеного комп'ютерного моделювання показано на рис. 7, де φ – значення кутів які задаються, β_s – значення кутів, що визначаються.

Крім того, побудовані математичні моделі дозволили отримати залежності похибок визначення кута (на основі застосування методу визначення ортогональних складових із застосуванням кругової дискретної згортки) від кута повороту ротора індукційного давача:

$$\delta = \varphi - \beta_s, \quad (19)$$

де δ – похибка визначення кута в абсолютному значенні (rad).

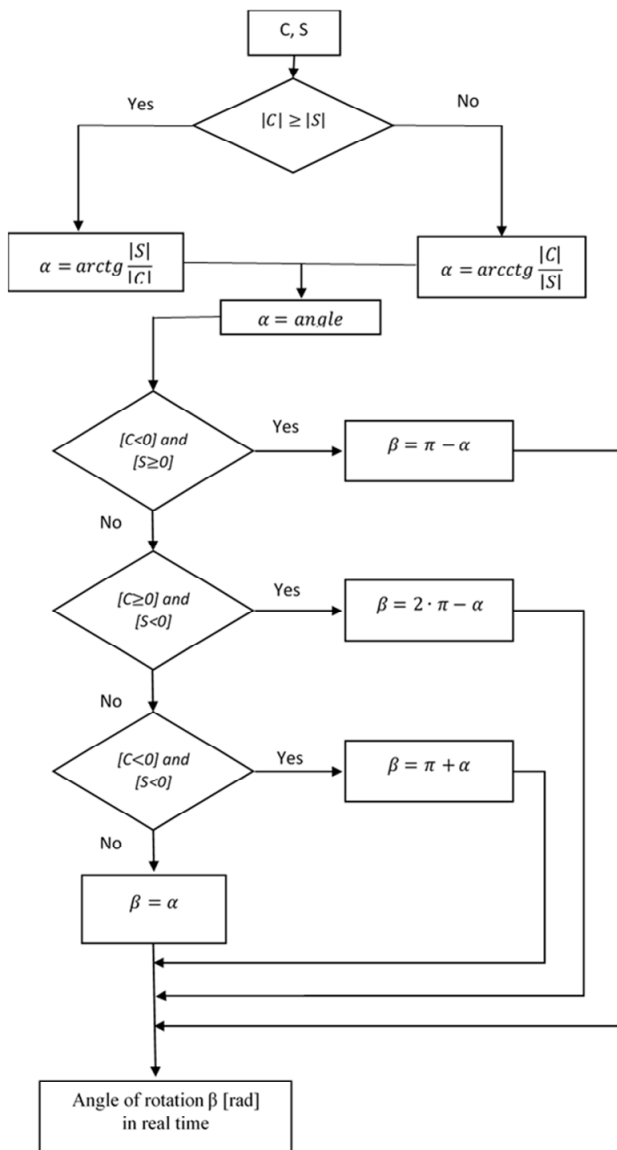


Рис. 6. Алгоритм роботи блоку Digital Phase Detector

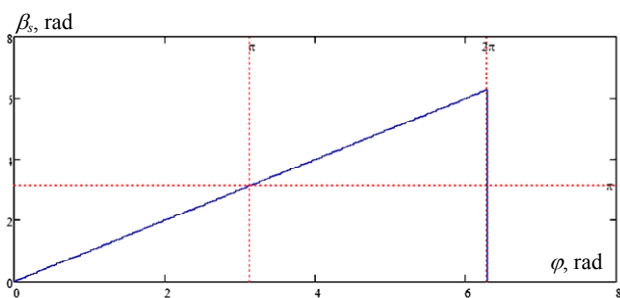


Рис. 7. Залежність визначеного кута β_s від кута повороту ротора індукційного давача φ у повному діапазоні кутових переміщень $0 - 2\pi$

Графічний результат моделювання виразу (19) наведено на рис. 8.

Моделювання залежностей похибок δ визначення кута β_s від кута повороту ротора індукційного давача φ дозволяє отримати значення середньоквадратичної похибки θ

$$\theta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (\delta_i^2)} = 9.73 \cdot 10^{-5} \text{ (rad)}, \quad (20)$$

де N – кількість визначених кутів, на проміжку від 0 до 2π , яка в комп'ютерному експерименті приймає значення 60000 .

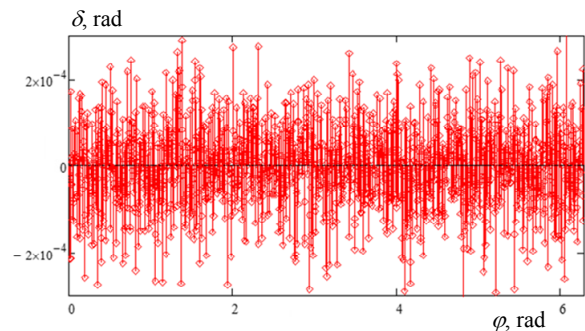


Рис. 8. Залежність похибок δ визначення кута β_s від кута повороту ротора індукційного давача φ

Експериментальна перевірка отриманих результатів. З метою підтвердження результатів теоретичного моделювання запропонованого методу було проведено експериментальне дослідження із використанням лабораторного устаткування, загальний вигляд якого зображено на рис. 9.



Рис. 9. Дослідне устаткування для визначення кутових переміщень

До складу такого устаткування входять наступні компоненти: черв'ячна передача (рис. 10), яка призначена для позиціонування точних кутів переміщення, яка складається із черв'ячного колеса (поз. 1.а на рис. 10) із 588 зубцями та черв'ячного валу (поз. 1.б на рис. 10), з'єднаним із кутовою шкалою (рис. 9), яка має 360 поділок. Тому, обертання черв'ячного валу на 360 поділок шкали відповідає тому, що черв'ячне колесо зробить переміщення на $1.068 \cdot 10^{-2}$ rad. Отже, здійснення переміщення черв'ячного валу на одну поділку шкали призведе до переміщення черв'ячного колеса на $2.967 \cdot 10^{-5}$ rad.

У якості індукційного давача (рис. 9) було використано обертовий трансформатор ВТ-5 КФ3.031.104 (рис. 11,а) класом точності А, номінальні технічні параметри якого відповідають даним табл. 1. Збудження такого давача необхідно напругою та частотою здій-

снюється за допомогою лабораторного двоканального генератора сигналів типу Г6-26 (рис. 11, *b*).

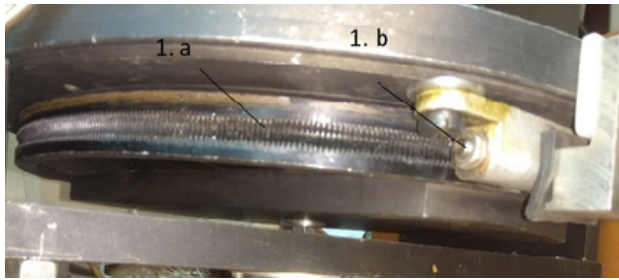


Рис. 10. Черв'ячна передача (загальний вигляд):
1.a – черв'ячне колесо; 1.b – черв'ячний вал

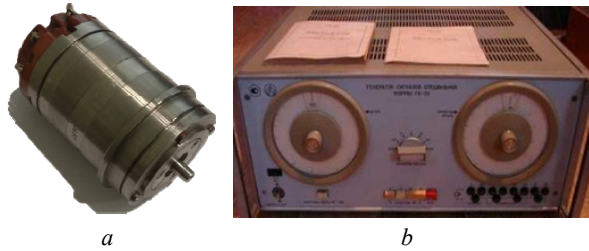


Рис. 11. Загальний вигляд: *a* – обертовий трансформатор ВТ-5; *b* – двоканальний генератор сигналів типу Г6-26

У якості перетворювача вхідних аналогових сигналів в дискретний код у вигляді масиву значень використовувався АЦП (рис. 9) та цифровий осцилограф INSTRUSTAR ISDS2062B (рис. 12, *a*) з подальшою передачею цих масивів через USB інтерфейс на комп'ютер (рис. 9) для виконання математичної обробки. Також для додаткового контролю точності черв'ячної передачі в дослідній установці використовується оптичний енкодер MEGATRON M600 (рис. 12, *b*).

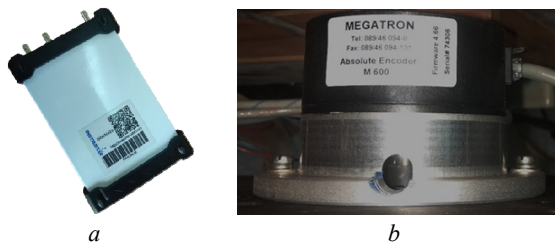


Рис. 12. Загальний вигляд:
a – цифровий осцилограф INSTRUSTAR ISDS2062B,
b – оптичний енкодер MEGATRON M600

Опис функціонування дослідної установки можна здійснити на основі використання її структурної схеми (рис. 13).

На спільній вісі установки зібрана черв'ячна передача – 1 (рис. 13), у якій черв'ячне колесо 1.a розміщене в горизонтальній площині з двома кінцями вихідного валу. Один кінець вихідного валу з'єднаний з ротором оптичного цифрового енкодера 7, а інший кінець вихідного валу через перехідну муфту з'єднаний з ротором індукційного давача кута 3. Таким чином, здійснивши обертання черв'ячного валу 1.b черв'ячної передачі 1, відбувається обертання черв'ячного колеса з вихідними кінцями валу, а отже і обертання ротора цифрового енкодера з однієї сторони, та обертання ротора індукційного давача з іншої сторони.

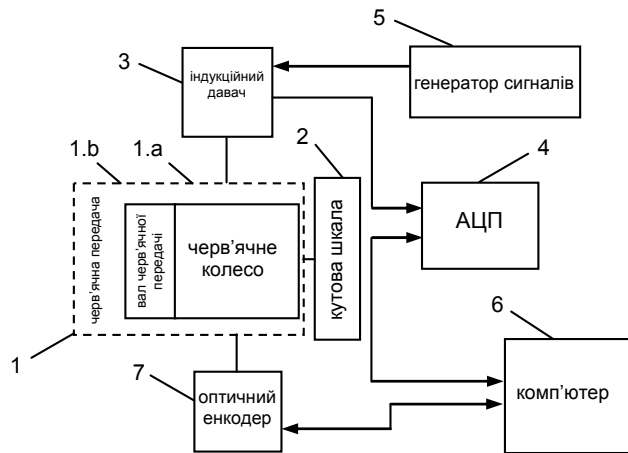


Рис. 13. Структурна схема дослідної установки:
1 – черв'ячна передача; 1.a – черв'ячне колесо;
1.b – вал черв'ячної передачі; 2 – кутова шкала;
3 – індукційний давач; 4 – АЦП; 5 – генератор сигналів,
6 – комп'ютер, 7 – оптичний енкодер

В свою чергу індукційний давач 3 отримує напруги збудження від генератора сигналів 5, які підводяться на обидві його статорні обмотки (обмотки збудження), причому ці сигнали збудження рівні за амплітудою та частотою, проте зміщені один відносно одного на 90° . Для представлення сигналів у цифрову форму його обмотки підключені до АЦП 4, роль якого в даній установці виконує цифровий осцилограф, який, в свою чергу, за допомогою USB інтерфейсу з'єднаний з комп'ютером. Також, із комп'ютером з'єднаний цифровий оптичний енкодер 7 для отримання живлення та обміну інформації за допомогою інтерфейсу RS-232.

Для відображення результатів дослідження було враховано те, що у виразі (20) у якості N (кількість визначених кутів) було використано 60000 значень, кількість яких неодмінно впливає на середньоквадратичну похибку, проте відобразити таку кількість експериментальних значень неможливо через їх значну кількість, що призведе до виходу за межі обсягу даної статті. Тому відображення результатів визначення кутів повороту ротора індукційного давача відносно його статора буде здійснюватись у межах від 0 до 2π з кроком $\pi/4$, що відображає повноту діапазону визначення значень кутів запропонованим методом. Результати проведення такого дослідження наведені в табл. 2, а його графічне представлення – на рис. 14.

Таблиця 2
Результати вимірювання кутів повороту ротора індукційного давача в межах від 0 до 2π та похибки вимірювання

Кут повороту φ , rad	Результат вимірювання енкодером α , rad	Результат вимірювання запропонованим методом β , rad	Похибка, δ rad
0	0	0	0
$\pi/4$	0.7853541	0.785423	$-2.481e-5$
$\pi/2$	1.5707623	1.5707155	$8.078e-5$
$3\pi/4$	2.356187	2.3560015	$1.929e-4$
π	3.1414934	3.1415226	$7.004e-5$
$5\pi/4$	3.9269856	3.9271619	$-1.71e-4$
$3\pi/2$	4.7124053	4.7124368	$-4.781e-5$
$7\pi/4$	5.4977544	5.4979427	$-1.556e-4$
2π	6.2831808	6.2831571	$2.824e-5$

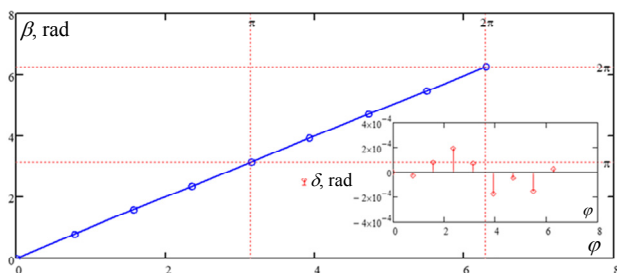


Рис. 14. Залежність вимірювальних кутів β від кута повороту ротора індукційного давача φ та похибки їх вимірювань δ

Також, для оцінки прецизійності цього методу в експериментальному дослідженні значення кута φ задаються в межах від 0 до $2.968 \cdot 10^{-3}$ rad з кроком $1.484 \cdot 10^{-4}$ rad. Результати таких досліджень наведені в табл. 3. Також на рис. 15 наведено графічні залежності вимірювального кута β від кута повороту ротора індукційного давача φ , а на рис. 16 – залежність похибок δ визначення кута β від кута повороту ротора індукційного давача φ .

Таблиця 3

Результати вимірювання кутів повороту ротора індукційного давача в межах від 0 до $2.968 \cdot 10^{-3}$ rad

Кут повороту φ , rad	Результат вимірювання енкадером α , rad	Результат вимірювання запропонованим методом β , rad	Похибка δ , rad
0	0	0	0
1.484e-4	1.5432383e-4	3.240248e-4	-1.756e-4
2.968e-4	2.8634171e-4	3.9410138e-4	-9.73e-5
4.452e-4	4.4453627e-4	6.3563009e-4	-1.904e-4
5.936e-4	5.5750648e-4	5.6524419e-4	2.835e-5
7.42e-4	8.1863463e-4	1.040776e-3	-2.988e-4
8.904e-4	8.596197e-4	6.8755041e-4	2.028e-4
1.039e-3	1.0080408e-3	8.3604738e-4	2.027e-4
1.187e-3	1.1244657e-3	8.3653092e-4	3.507e-4
1.336e-3	1.2784218e-3	1.2367585e-3	9.883e-5
1.484e-3	1.4806882e-3	1.6892879e-3	-2.053e-4
1.632e-3	1.5963308e-3	1.61913e-3	1.325e-5
1.781e-3	1.7276265e-3	1.6229882e-3	1.578e-4
1.929e-3	1.9333049e-3	2.0505456e-3	-1.214e-4
2.078e-3	2.0740721e-3	2.1002799e-3	-2.27e-5
2.226e-3	2.1709733e-3	2.2081033e-3	1.787e-5
2.374e-3	2.3909902e-3	2.6908347e-3	-3.165e-4
2.523e-3	2.5283926e-3	2.6856021e-3	-1.628e-4
2.671e-3	2.6501764e-3	2.7511128e-3	-7.994e-5
2.82e-3	2.7910538e-3	2.5065176e-3	3.131e-4
2.968e-3	3.0097617e-3	2.9269924e-3	4.097e-5

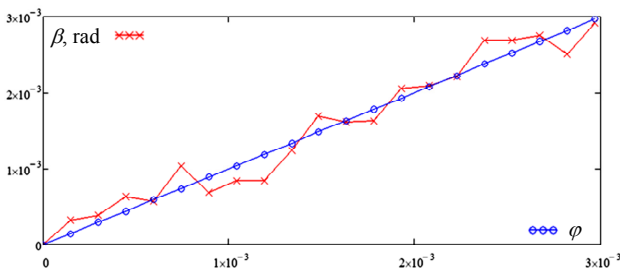


Рис. 15. Залежність вимірювального кута β від кута повороту ротора індукційного давача φ

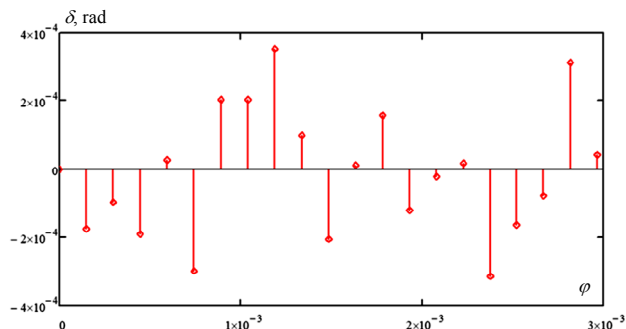


Рис. 16. Залежність похибок δ визначення кута β від кута повороту ротора індукційного давача φ

Результати отриманих значень похибок δ , які зазначені в табл. 3, з подальшою їх підстановкою у вираз (20), дозволяють здійснити оцінку середньоквадратичної похибки визначення кутів повороту ротора індукційного давача відносно його статора. Результат такого обчислення становить $1.913 \cdot 10^{-4}$ rad, і тим самим, дозволяє підтвердити достатньо високу прецизійність запропонованого методу.

Висновки.

1. У даній роботі представлено спеціальне математичне забезпечення для нового методу зменшення похибки визначення кутових переміщень ротора індукційного давача, який базується на основі визначення кута зсуву фаз сигналів. У даному методі використовується кругова дискретна згортка для досягнення найбільш точного наближення отриманих значень сигналу до косинусоїди та синусоїди відповідно. Після чого здійснюється визначення ортогональних складових і за допомогою цифрового детектора визначається кут зсуву фази у повному діапазоні $0-2\pi$ кутових переміщень.

2. Наведені результати комп'ютерного моделювання та результати експериментального дослідження дещо відрізняються, що може бути пояснено тим, що під час експериментального дослідження використовувався аналого-цифровий перетворювач меншої розрядності, ніж у математичній моделі. Проте, отримані результати комп'ютерного моделювання із урахуванням високого рівня шумів сигналу і результати експериментального дослідження дозволяють підтвердити високу прецизійність цього методу і те, що він може бути застосований в таких системах, де потрібна висока точність позиціонування, а швидкість обертання вала давача наближена до нуля.

3. Авторами запропоновано програмно-технічне забезпечення розв'язання даної задачі, а його реалізація цілком може бути здійснена на основі використання комерційних аналого-цифрових перетворювачів та недорогих мікропроцесорів. Проте, від параметрів таких електронних компонентів буде залежати точність і швидкодія визначення кутів переміщення ротора індукційного давача запропонованим методом, а отже це передбачає розробку методики щодо вибору апаратного забезпечення та його вплив на точність і швидкодію процесу вимірювання кута, що може бути наступним розвитком досліджень у даному напрямку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hicks T., Atherton P. *The Nano Positioning Book: Moving and Measuring to Better Than a Nanometre*. ISTE Publishing Company, 1997. 120 p.
2. Auger F., Mansouri-Toudert O., Chibah A. Design of advanced resolver-to-digital converters. *Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems. 10th International Conference ELECTRIMACS*. Cergy-Pontoise (France), 6-8 June 2011.
3. Sivappagari C.M.R., Konduru N.R. Review of RDC soft computing techniques for accurate measurement of resolver rotor angle. *Sensors and Transducers*, 2013, vol. 150, no. 3, pp. 1-11.
4. Завгородній В.Д., Мороз В.І., Петрова О.А. Квантово-механічна модель давачів кута індукційного типу (Частина 4. Аналіз методів обробки вихідних сигналів). *Електротехніка і електромеханіка*, 2003, № 4, С. 36-41.
5. Verma A., Chellamuthu A. Design considerations for resolver-to-digital converters in electric vehicles. *Analog Applications Journal*, 2016, vol. Q1, pp. 9-13.
6. Benammar M., Gonzales A.S.P. A Novel PLL Resolver Angle Position Indicator. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, vol. 65, no. 1, pp. 123-131. doi: 10.1109/TIM.2015.2476280.
7. Wang S., Kang J., Degano M., Buticchi G. A Resolver-to-Digital Conversion Method Based on Third-Order Rational Fraction Polynomial Approximation for PMSM Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66, no. 8, pp. 6383-6392, doi: 10.1109/TIE.2018.2884209.
8. Wang Y., Zhu Z., Zuo Z. A Novel Design Method for Resolver-to-Digital Conversion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 62, no. 6, pp. 3724-3731. doi: 10.1109/tie.2014.2375254.
9. Shabatura Y.V., Snitkov C.I., Seredyuk B.O. Mathematical model for determination of angular variables using the angular induction sensor in the phase mode for guiding a typical artillery system. *SDirect24*, 2018, no. 2/(7). Режим доступу: <https://www.sdirect24.org/nato-deep-no-7>. – Дата звертання: 15.06.2020.

REFERENCES

1. Hicks T., Atherton P. *The Nano Positioning Book: Moving and Measuring to Better Than a Nanometre*. ISTE Publishing Company, 1997. 120 p.
2. Auger F., Mansouri-Toudert O., Chibah A. Design of advanced resolver-to-digital converters. *Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems. 10th International Conference ELECTRIMACS*. Cergy-Pontoise (France), 6-8 June 2011.
3. Sivappagari C.M.R., Konduru N.R. Review of RDC soft computing techniques for accurate measurement of resolver rotor angle. *Sensors and Transducers*, 2013, vol. 150, no. 3, pp. 1-11.
4. Zavgorodniy V.D., Moroz V.I., Petrova O.A. Quantum-mechanical model of induction type angle sensors (Part 4. Analysis of output signal processing methods). *Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no. 4, pp. 36-41. (Ukr).
5. Verma A., Chellamuthu A. Design considerations for resolver-to-digital converters in electric vehicles. *Analog Applications Journal*, 2016, vol. Q1, pp. 9-13.
6. Benammar M., Gonzales A.S.P. A Novel PLL Resolver Angle Position Indicator. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, vol. 65, no. 1, pp. 123-131. doi: 10.1109/TIM.2015.2476280.
7. Wang S., Kang J., Degano M., Buticchi G. A Resolver-to-Digital Conversion Method Based on Third-Order Rational Fraction Polynomial Approximation for PMSM Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66, no. 8, pp. 6383-6392, doi: 10.1109/TIE.2018.2884209.

8. Wang Y., Zhu Z., Zuo Z. A Novel Design Method for Resolver-to-Digital Conversion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 62, no. 6, pp. 3724-3731. doi: 10.1109/tie.2014.2375254.

9. Shabatura Y.V., Snitkov C.I., Seredyuk B.O. Mathematical model for determination of angular variables using the angular induction sensor in the phase mode for guiding a typical artillery system. *SDirect24*, 2018, no. 2/(7). Available at: <https://www.sdirect24.org/nato-deep-no-7> (accessed 15 June 2020).

Надійшла (Received) 23.09.2020

Прийнята (Accepted) 08.11.2020

Опублікована (Published) 24.12.2020

Снітков Костянтин Ігорович¹, ад'юнкт,
Шабатура Юрій Васильович¹, д.т.н., проф.,
¹Національна академія сухопутних військ
імені гетьмана П. Сагайдачного,
79026, Львів, вул. Героїв Майдану, 32,
e-mail: canstantin@gmail.com, shabaturayuriy@gmail.com

K.I. Snitkov¹, Y.V. Shabatura¹
¹Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy,
32, Heroes of Maidan Str., Lviv, 79026, Ukraine.

A method of reducing the error in determining the angular displacements when using inductive sensors.

Goal. Representation of a special mathematical software for determining the angular displacements of the rotor of the induction angle sensor – resolver (rotating transformer) for applications in which the speed of the sensor's rotor is close to zero. As well as performing its experimental verification. **Methodology.** The presented method is based on the determination of the phase shift angle of the output signals of the induction sensor, which is determined by comparing the obtained arrangements of signal values with a circular discrete convolution in order to achieve the most precise approximation of the obtained signal values to cosine and sine. The conversion of orthogonal components to an angle is based on the use of a digital phase detector which is use of a software comparator and inverse trigonometric functions. **Results.** Based on the obtained results of mathematical modeling and experimental research, the characteristic dependencies of the angle of rotation of the rotor of the induction sensor relative to its stator, the nature of which is linear, were obtained. In addition, the estimation of measurement errors of angular displacements is carried out that occur when defining such angles by the method offered. The obtained results of the computer simulation taking into account the high signal noise, as well as the results of experimental investigations, confirm the high precision of this method and the fact that it can be used in systems where high positioning accuracy is required and the speed of the sensor shaft is close to zero. **Originality.** This article introduces, for the first time, special mathematical software for a new method of determining the angular displacements of the rotor of an induction sensor, which is based on the determination of the orthogonal components of the signal in combination with the use of a circular discrete convolution in the determination of the phase shift angle of the induction sensor signals. **Practical meaning.** The proposed method does not require the use of demodulators, counters and quadrant tables associated with conventional methods for determining the phase shift of signals. The presented method can be used to measure the full range of $0-2\pi$ angular displacements in real time, is simple and can be easily implemented using digital electronic circuitry. References 9, tables 3, figures 16.

Key words: angular displacements, mathematical method, induction sensor, rotating transformer, circular discrete convolution, orthogonal components, precision, phase shift.