

## КВАНТОВО-МЕХАНІЧНА МОДЕЛЬ ДАВАЧІВ КУТА ІНДУКЦІЙНОГО ТИПУ (ЧАСТИНА 6. БЕЗКОНТАКТНІ ДАВАЧІ ОБМЕЖЕНОГО КУТА ПОВОРОТУ)

Завгородній В.Д., к.т.н., доц.

Національний університет "Львівська політехніка", СКБ електромеханічних систем  
Україна, 79000, Львів, вул. Ак. Колесси, 2, СКБ ЕМС  
тел./факс (0322)74-01-44, E-mail: snt68@polynet.lviv.ua, viza@astra.lviv.ua

*Описано нові конструкції безконтактних індукційних давачів обмеженого кута повороту, реалізованих на магнітних системах трансверсного магнітного потоку. Наведено результати аналізу метрологічних показників цих конструкцій на основі ідей і термінології М. Фарадея та їх порівняння з експериментальними даними.*

*Описаны новые конструкции бесконтактных индукционных датчиков ограниченного угла поворота, реализованных на магнитных системах трансверсного магнитного потока. Приведены результаты анализа этих конструкций на основе идей и терминологии М. Фарадея и их сравнение с экспериментальными данными.*

*Пам'яті видатних електромеханіків радянської доби А.Г.Іосиф'яна й Д.В.Свечарніка присвячую*

“ – Ну що ж, кожному – своє. Я в сельсинах викинув ковзний контакт, а ви пропонуєте викинути м'який знак.”<sup>1)</sup>  
Акад. А.Г. Іосиф'ян

### ВСТУП

У багатьох пристроях автоматизованого супроводу, сканування тощо індукційний давач кута (ДК) працює в обмеженому діапазоні зміни вхідного кута, а конструкція базового об'єкта не дозволяє надати йому циліндричної форми і вимагає так званого "дугостаторного" конструктивного виконання. Крім того, у більшості випадків основною з вимог є безконтактність ДК, тобто системи його обмоток (збудження й сигнальних) повинні розташовуватись лише на статорі, а за ротор править пасивний зубчастий феромагнітний елемент. Конструкції безконтактних індукційних ДК відомі. Всі вони базуються на принципі диференційного трансформатора (ДТ). Принцип дії ДТ ґрунтується на перерозподілі магнітних потоків в стрижнях осердя статора при зміні куткового положення ротора, внаслідок чого в сигнальній обмотці виникає різниця е.р.с., фаза якої залежить від напрямку руху.

Конструкція дугостаторного ДТ показана на рис.1 у двох модифікаціях: з тристрижневим (а) та чотиристрижневим (б) магнітним осердям статора.

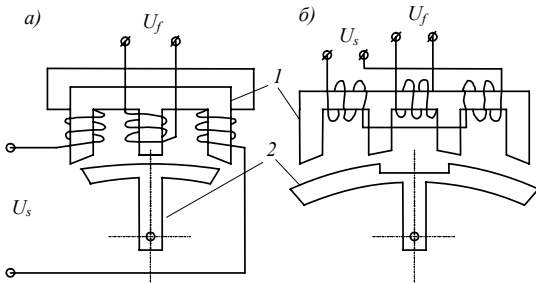


Рис.1. Структура магнітного кола й схеми з'єднань обмоток ДТ: а) – тристрижневого; б) - чотиристрижневого

<sup>1)</sup> Зі слів Д.В.Свечарніка цією фразою акад. Іосиф'ян парировав пропозицію однієї спеціалізованої ради замінити термін *сельсин* на *селсин* у відповідності до вимови англійсько-го етимону *selsyn*.

Основною перевагою ДТ є простота конструкції, що легко піддається мініатюризації, за значної крутизни вихідної характеристики, а недоліками – обмежений діапазон зміни вхідного кута ( $\text{mod } \zeta < 0,1$ ) і наявність значного реактивного моменту<sup>2)</sup>.

Коловий різновид ДТ реалізовано в конструкції електромеханічного перетворювача типу мікросин [1], основні особливості якого й схеми з'єднань обмоток показано на рис. 2, де (і на всіх наступних) позначено: 1 і 2 – магнітопровід статора і ротора відповідно;  $f$  і  $s$  – обмотки збудження й сигнальна відповідно.

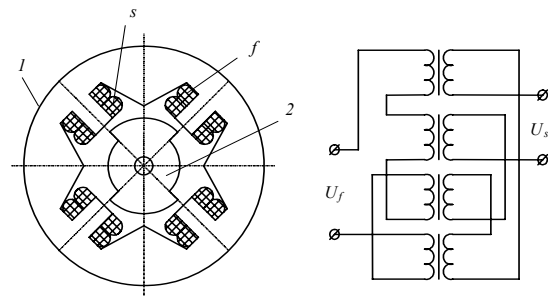


Рис. 2. Структура магнітного кола й схема з'єднань обмоток мікросина

Мікросин, працюючи в обмеженому діапазоні кута повороту, має циліндричну конструкцію, внаслідок чого характеризується практичною відсутністю реактивного моменту, бо сумарний магнітний потік полюсів не залежить від куткового положення ротора.

Носієм інформації в згаданих конструкціях є амплітуда вихідного сигналу, що не дозволяє досягнути точності й розрядності гоніометричних систем на їх основі, які властиві фазокодувальним системам.

Кодування інформації про вхідний кут фазою вихідного сигналу забезпечує конструкція диференційного синусно-косинусного ДК, показана на рис. 3 [2], але її не можна виконувати у дугостаторному варіанті внаслідок значних похибок, обумовлених осередковими та обмотковими краєвими ефектами.

<sup>2)</sup> Термін *реактивний момент* тут ужито в його прямому значенні як момент протидії (реакції) переміщенню ротора, а не в тому значенні, що його використовують більшість електромеханіків для опису *релактансного* моменту.

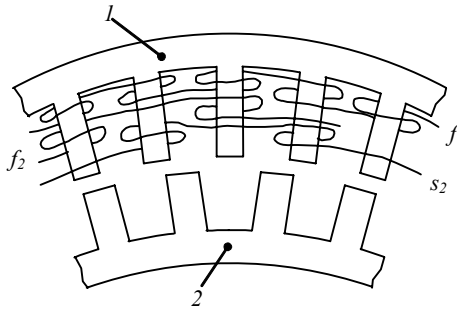


Рис. 3. Структура магнітного кола й схема навивання обмоток диференційного синусно-косинусного ДК

Отже, нині задача підвищення точності й розрядності гоніометричних систем диктує нагальну необхідність розроблення нових конструкцій первинних ДК, оскільки методи опрацювання їхніх сигналів досить докладно розроблені й описані [3, 4].

### НОВІ КОНСТРУКЦІЇ БЕЗКОНТАКТНИХ ДК ОБМЕЖЕНОГО КУТА ПОВОРОТУ

На основі квантово-механічного підходу доведено [5], що за ідеальної структури магнітного кола ДК амплітуда і фаза енергетичного стану (за термінологією М. Фарадея – "electro-tonic state" (ETS) [6]) кожного зубця є величинами сталими.

У реальних конструкціях індукційних перетворювачів цю особливість можна забезпечити штучно шляхом видозміни магнітного кола, а саме: заміною замкненості магнітного потоку по тангенціальній координаті його замкненістю по аксіальній координаті, як це досить наближено показано на рис. 4, а на рис. 5 – розташування обмоток системи збудження  $f$  і сигнальної –  $s$ . Окремі елементи магнітопроводів в такій конструкції можуть мати як П-подібну форму (рис. 4а), так і Ш-подібну (рис. 4б). Їх виготовляють шихтованими з електротехнічної сталі або з феритів різних марок залежно від умов експлуатації і частоти сигналів.

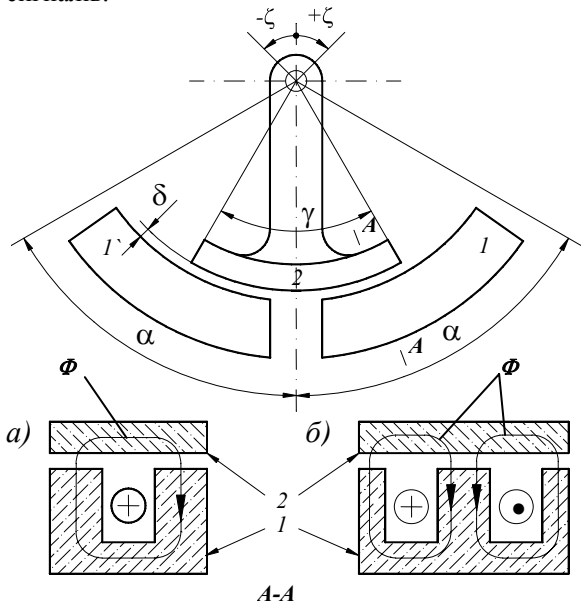


Рис. 4. Структура TV магнітної системи ДК на базі П-подібних (а) і Ш-подібних (б) осердь

Якщо система збудження магнітопровода статора живиться від двох джерел синусоїдних напруг  $\dot{U}_f$  і  $\dot{U}'_f$  (рис. 5), зсув фази між якими  $\beta$ , ДК працює у фазовому режимі. Якщо ж обмотки  $f$  і  $f'$  з'єднати послідовно-зустрічно, ДК працюватиме в амплітудному режимі.

У такій конструкції магнітний потік кожного елемента індуктора є автономним і замикається по меридіанам еквівалентного тора в площині ортогональній до площини замикання потоку в класичних конструкціях електромеханічних перетворювачів. Тому надалі таку конструкцію ДК іменуватимемо конструкцією з трансверсною (TV) магнітною системою.

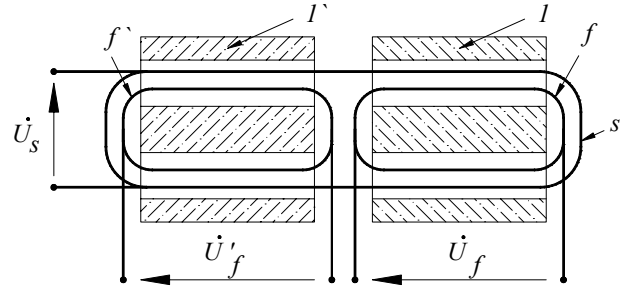


Рис. 5. Розташування на Ш-подібних осердях обмоток збудження  $f$  і  $f'$ , і сигнальної  $s$

Перевагами TV-систем є: практично повна ануляція як обмоткового, так і осердевого краєвих ефектів, а також реактивного моменту. Крім того, вони дозволяють застосування синусних обмоток обмеженого кута розташування, як це показано на рис. 6.

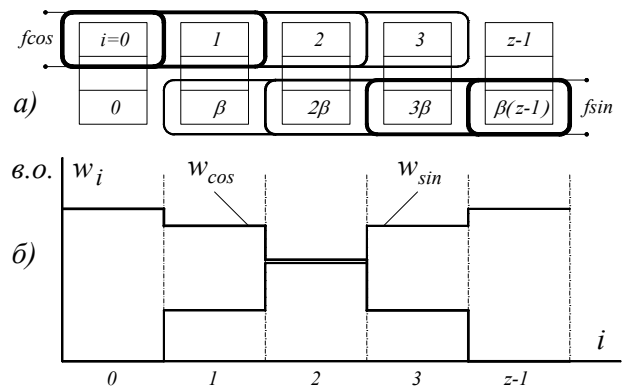


Рис. 6. Структурна схема синусних обмоток обмеженого розподілу (а) і розподіл витків на зубцях (б)

Особливість таких обмоток – це те, що вони можуть мати кількість пар полюсів  $p < l$ . Справді, якщо кількість витків на кожному із зубців пропорційна  $\sin$  і  $\cos$  деякого кута  $\beta \cdot i$  (де  $i$  – номер зубця), то за живлення обмоток квадратурними струмами магнітний потенціал кожного із зубців буде

$$F_i = F_m (\cos(\beta \cdot i) \cdot \cos(\omega \cdot t) + \sin(\beta \cdot i) \cdot \sin(\omega \cdot t)) \propto F_m \cdot e^{-j\beta \cdot i},$$

де значення  $\beta$  може бути меншим ніж  $2\pi/z$ .

Недоліком TV-магнітних систем є збільшення аксіального розміру ДК за одночасного зменшення магнітної провідності повітряного проміжку. Але для ДК, який є не енергетичним електромеханічним пере-

творювачем, а інформаційним, – це не суттєво. Крім того це полегшує адаптацію параметрів обмотки збудження до джерела живлення.

Автономність магнітного кола кожного із зубців знижує чутливість конструкції до технологічних дисторсій (механічний наклеп, ексцентриситети тощо), які обумовлюють відхилення форми розподілу магнітного потоку по розточці від розрахункової, а відтак і технологічні похибки перетворення кутової координати в фазу сигнальної е.р.с [7].

Незважаючи на те, що, як і сельсин, ДК традиційного конструктивного виконання належать до класу індукційних електромеханічних перетворювачів, особливості його функціонування у фазовому режимі унеможливають реалізацію ідеї А. Іосиф'яна й Д. Свечарніка, покладеної в основу конструкції безконтактних сельсинів. Наявність же у магнітопроводах TV-типу пазів за тангенціальною координатою дозволяє в одній конструкції перетворювача сумістити структури власне ДК і кільцевих трансформаторів (КТ) для безконтактної передачі сигналів збудження на ротор, або інформаційних сигналів на статор, як це показано на рис. 7, де позначено  $1_k$  і  $2_k$  – первинна й вторинна обмотки КТ каналів  $\cos$  і  $\sin$ ;  $s_{\cos}$  і  $s_{\sin}$  – сигнальні обмотки (статора);  $f_{\cos}$  і  $f_{\sin}$  – обмотки збудження (ротора); 1 і 2 – елементи TV-магнітопроводів відповідно статора і ротора (показано тільки частину їх). На рис. 7а) показано конструкцію безконтактного ДК в цілому; на рис. 7б) – структуру й взаємне розташування статорних обмоток (для роторних обмоток вони є аналогічними).

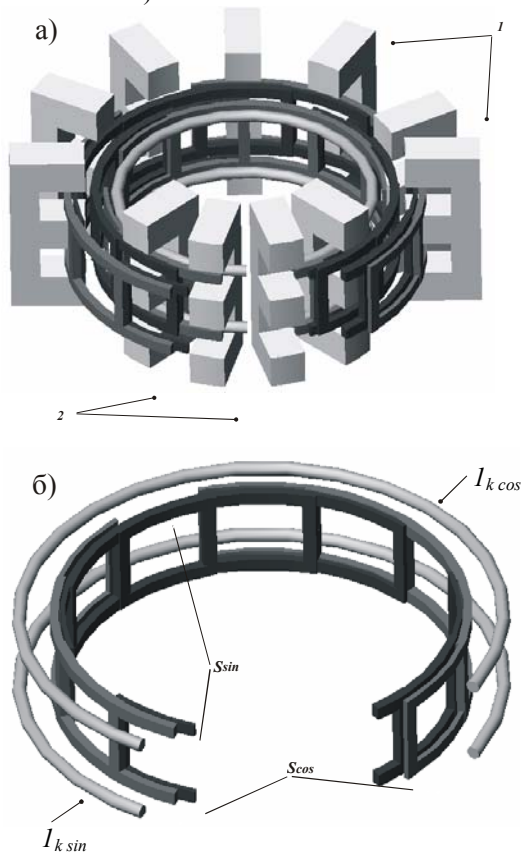


Рис. 7. Конструкція безконтактного ДК з TV-магнітною системою (а); структура і взаємне розташування обмоток статора (б)

На рис. 8 приведена схема з'єднань обмоток одного з каналів. Обмотки КТ  $1_k \cos$  і  $2_k \sin$  створюють уніполярний за тангенціальною координатою магнітний потік, який не зчіплюється з жодною із обмоток  $f$  чи  $s$  власне ДК, тобто в електромагнітному плані ці системи обмоток є ортогональними і коефіцієнт взаєміндукції між ними дорівнює нулеві. Наявність гальванічного зв'язку між вторинними обмотками КТ ( $2_{k\cos}$  і  $2_{k\sin}$ ) і синусними обмотками збудження  $f_{\cos}$  і  $f_{\sin}$  не впливає на метрологічні показники ДК. Якщо сигнальна обмотка одна, безконтактний ДК можна реалізувати на елементах магнітопроводів П-подібної форми.

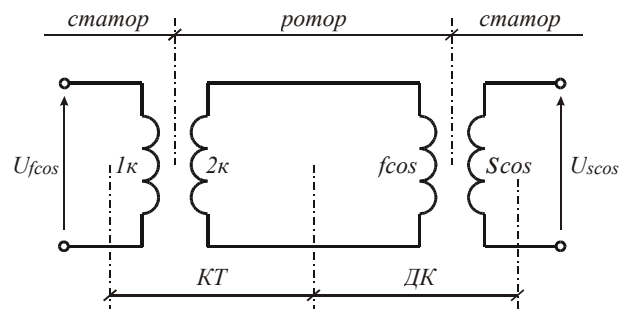


Рис. 8. Схема з'єднання обмоток каналу  $\cos$

ДК розглянутої конструкції може працювати у тих же режимах, що й обертовий трансформатор (ОТ) традиційної конструкції [8]: синусно-косинусного ОТ, лінійного ОТ, перетворювача координат, фазовертача й в режимі трансформаторної синхронної передачі геометричного кута.

Ціною оплати за безконтактність ДК є збільшення площі поперечного перетину вікон елементів магнітопроводів (для розташування обмоток КТ) і витрат обвиткового дроту майже у два рази.

#### ETS ЕЛЕМЕНТІВ СТРУКТУРИ БЕЗКОНТАКТНОГО ДК

Основними структурними параметрами активної частини безконтактного ДК є: кутова ширина зубцевих поділок статора  $\alpha$ ; ціна дискрети фазового фактора ETS (векторного потенціалу) цих поділок  $\beta$  і кутова ширина пасивного зубця ротора  $\gamma$ . З метою дослідження впливу взаємних відношень цих параметрів на метрологічні характеристики ДК величину  $\gamma$ , як показано на рис. 9, запишемо в частках значення  $\alpha$  як  $\gamma = \alpha (r + f)$ , де  $r = \text{integr}(\gamma/\alpha)$  – ціле число, а  $f = \text{fraction}(\gamma/\alpha)$  – просте дробове число, тобто  $0 < f < 1$ .

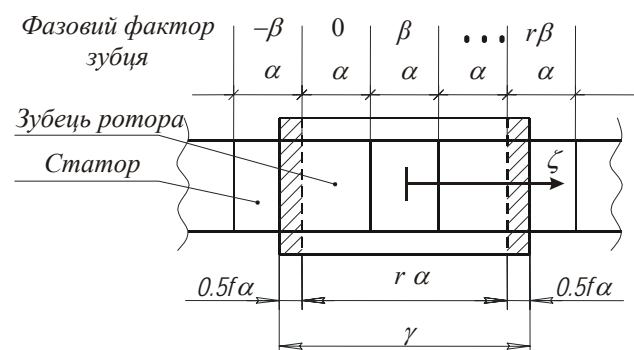


Рис. 9. Структура активної частини безконтактного ДК

Надалі всі геометричні кутові розміри структури й координату переміщення  $\zeta$  записуватимемо у відносних одиницях значення  $\alpha$ , покладаючи  $\alpha \propto 1$ ;  $\gamma \propto r + f$ .

ETS  $i$ -того зубця статора запишемо як  $\exp(j\beta i)$  [5], тоді при переміщенні зубця ротора у межах зубцевої поділки статора  $0 \leq \zeta \leq 1$  ETS його частини  $r$  визначається виразом

$$\begin{aligned} \psi_r &= \sum_{i=0}^{r-1} e^{j\beta i} + \zeta \cdot (e^{j\beta r} - 1) = \\ &= \frac{\sin(0,5 \cdot \beta \cdot r)}{\sin(0,5 \cdot \beta)} \cdot \left( e^{-j \cdot 0,5 \cdot \beta} + j \cdot 2\zeta \cdot \sin \frac{\beta}{2} \right) \cdot e^{j \cdot 0,5 \cdot \beta \cdot r}. \end{aligned} \quad (1)$$

Тут і надалі опустимо постійну складову фазового фактора  $0,5 \cdot \beta \cdot r$  і, взявши до уваги, що завжди  $\beta \leq 0,3$ , покладемо  $\exp(j\beta) \approx 1 + j\beta$ ,  $\sin(0,5 \cdot \beta \cdot r) / \sin(0,5 \cdot \beta) \approx r$ , а  $\cos(0,5 \cdot \beta \cdot r) \approx 1$  (реалізацію таких операцій позначатимемо знаком  $\propto$ ), що дозволить записати (1) у вигляді

$$\psi_r(\zeta) \propto r(1 + j \cdot \beta \cdot (\zeta - 0,5)), \quad \text{якщо } 0 \leq \zeta \leq 1. \quad (2)$$

За наявності дробової частки  $f$  взаємна топологія розташування зубців статора й ротора в діапазоні  $0 \leq \zeta \leq 1$  описується трьома тактовими станами. В інтервалі першого такту ( $0 \leq \zeta \leq 0,5f$ ) ETS частки  $f$  опишемо функцією

$$\psi_{1f}(\zeta) = \zeta + (0,5 \cdot f - \zeta) \cdot e^{-j\beta} + 0,5 \cdot f \cdot e^{j\beta r},$$

або

$$\psi_{1f}(\zeta) \propto f + j \cdot \beta \cdot (\zeta - 0,5 \cdot f). \quad (3)$$

Другий тактовий стан, коли  $0,5f \leq \zeta \leq 1 - 0,5f$ , опишемо як

$$\psi_{2f}(\zeta) = 0,5 \cdot f \cdot (1 + e^{j\beta r}) \propto f. \quad (4)$$

Аналогічно, третій тактовий стан ( $1 - 0,5f \leq \zeta \leq 1$ ) частки  $f$  визначає вираз

$$\psi_{3f}(\zeta) = \zeta + (0,5 \cdot f - \zeta) \cdot e^{-j\beta} + 0,5 \cdot f \cdot e^{j\beta r},$$

або

$$\psi_{3f}(\zeta) \propto f + j \cdot \beta \cdot (\zeta - 1 + f). \quad (5)$$

Отже, взаємний стан зубців статора і ротора описується функцією  $\psi = \psi_r + \psi_{fk}$  ( $k = 1, 2, 3$ ), яку після нормування на значення  $r + f$  і перенесення координат до центру зубцевої зони ( $\zeta = 0,5$ ) запишемо як

$$\psi(\zeta) = 1 + j \cdot \beta \cdot \chi(\zeta), \quad (6)$$

$$\text{де } \chi = \begin{cases} \frac{\zeta \cdot (r+1) + (1-f)/2}{r+f}, & \text{якщо } -\frac{1}{2} \leq \zeta \leq \frac{f-1}{2}; \\ \frac{\zeta \cdot r}{r+f}, & \text{якщо } \frac{f-1}{2} \leq \zeta \leq \frac{1-f}{2}; \\ \frac{\zeta \cdot (r+1) - (1-f)/2}{r+f}, & \text{якщо } \frac{1-f}{2} \leq \zeta \leq \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (7)$$

Перепишемо (7) у форматі експоненти

$$\psi(\zeta) = \rho \cdot e^{j\varphi}, \quad (8)$$

де  $\rho(\zeta) = \sqrt{1 + \beta^2 \cdot \chi(\zeta)^2}$  – амплітуда ETS;

$\varphi(\zeta) = \arctg(\beta \chi(\zeta)) \approx \beta \chi(\zeta)$  (бо  $|\chi| \leq 0,5$ ) і  $\beta \leq 0,3$ ) – його фазовий фактор.

Вираз (8) описує ETS в діапазоні зміни  $0 \leq \zeta \leq 1$ , а для довільної координати  $\zeta' = i \cdot \alpha + \zeta$  він трансформується до виразу

$$\psi(\zeta') = \rho(\zeta) \cdot e^{j(\beta i + \varphi(\zeta))}. \quad (9)$$

## АНАЛІЗ ФУНКЦІЙНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ

Вираз (9) свідчить, що як амплітуда  $\rho(\zeta)$ , так і фазовий фактор  $\varphi(\zeta)$  ETS є модульованими за координатою  $\zeta$  із періодом модуляції  $\alpha$ . Функція  $\rho(\zeta)$  є парною і має екстремуми, сягаючи максимального значення  $\rho_{\max} = \sqrt{1 + 0,25 \cdot \beta^2}$  на границях інтервалу  $\zeta = \pm 0,5$ , а мінімального ( $\rho_{\min} = 1$ ) – у центрі інтервалу  $\zeta = 0$ . На рис. 10,а приведені залежності  $\rho(\zeta)$  для  $r = 1$ ;  $\beta = \pi/8$  і  $f = 0; 0,25; 0,5; 0,75$ . Глибина модуляції  $\rho$  слабо залежить від значення  $r$  (найбільшою є при  $r = 1$ ) і незалежно від  $r$  прямо пропорційна значенню  $\beta^2$ . Що ж до залежності  $\varphi(\zeta)$ , то вона є непарною кучно-ламаною функцією (рис. 10,б).

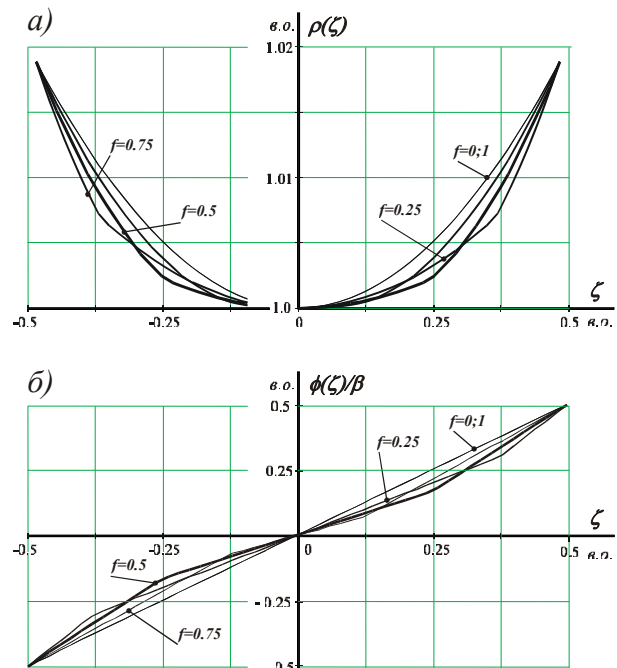


Рис. 10. Функційні залежності  $\rho(\zeta)$  – а) і  $\varphi(\zeta)$  – б) при  $r = 1$  і різних  $f$

Для більшої наочності на рис. 11 показано вплив параметра  $f$  на дисторсію  $\rho$  і  $\varphi$  у порівнянні з випадком, коли  $f = 0$ . На рис. 11,а приведені залежності  $\Delta\rho(\zeta) = \rho(\zeta, f) - \rho(\zeta, f = 0)$ , а на рис. 11,б – залежності  $\Delta\varphi(\zeta) = \varphi(\zeta, f) - \varphi(\zeta, f = 0)$ . Оскільки девіація амплітуди  $\rho$  не впливає на похибку ідентифікації кута  $\zeta$  [3, 4], в подальшому основна увага приділена девіації  $\Delta\varphi$ , яку на основі (7) і (8) в аналітичному вигляді запишемо як

$$\Delta\varphi = \beta \times \begin{cases} \left( \zeta + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{1-f}{r+f}, & \text{якщо } -\frac{1}{2} \leq \zeta \leq \frac{f-1}{2}; \\ \zeta \cdot \frac{f}{r+f}, & \text{якщо } \frac{f-1}{2} \leq \zeta \leq \frac{1-f}{2}; \\ \left( \zeta - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{1-f}{r+f}, & \text{якщо } \frac{1-f}{2} \leq \zeta \leq \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (10)$$

Максимального значення похибка відтворення кутової координати  $\zeta$  набуває на границях інтервалу  $\zeta = \pm 0,5 (1 - f)$ . Вона рівна

$$|\Delta\varphi_{\max}| = \frac{1}{2} \beta \cdot f \cdot \frac{1-f}{r+f} \quad (11)$$

При заданому  $r$   $|\Delta\varphi_{\max}|$  сягає найбільшого значення при  $f = \sqrt{r^2 + r} - r$ . Так, при  $r = 1$   $|\Delta\varphi_{\max}| = \beta \cdot (1,5 - \sqrt{2}) \approx 0,086 \cdot \beta$ .

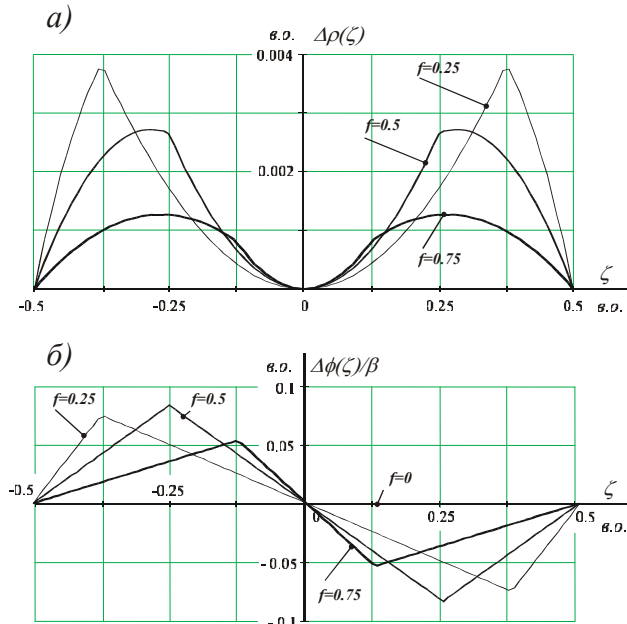


Рис.11. Функційні залежності  $\Delta\varphi(\zeta)$  – а) і  $\Delta\varphi(\zeta)/\beta$  – б) при  $r = 1$  і різних  $f$

Обвідні сімейства кривих, що на рис. 11,б для різних значень  $r$  показано на рис. 12

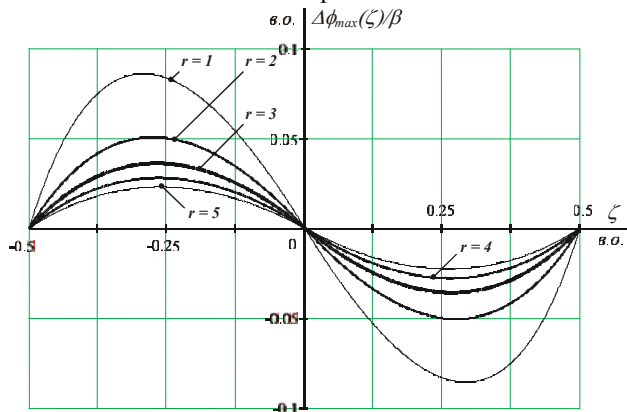


Рис.12. Залежності  $\Delta\varphi_{\max}(\zeta)$  при різних значеннях  $r$

Функція (10) легко піддається аналітичному розкладу в ряд Фур'є, а саме

$$\Delta\varphi(\zeta) = \sum_{v=1} a_v \cdot \sin(2\pi v \zeta), \text{ де } a_v = \frac{(-1)^v \beta}{r+f} \cdot \frac{\sin(\pi v f)}{\pi^2 \cdot v^2}$$

З огляду на те, що  $a_v \approx 1/v^2$ , цей ряд можна обмежити першими трьома його членами.

Внаслідок того, що в (10) ми обмежились вели-

чинами першого порядку малості, з (11) випливає, що  $\Delta\varphi(\zeta, \beta = 0) = 0$ , але це не цілком так. Перепишемо (1) в дещо іншому форматі

$$\psi_r = \frac{\sin(0,5\beta r)}{\text{tg}(0,5\beta)} \cdot \left(1 + j(2\zeta - 1) \cdot \text{tg} \frac{\beta}{2}\right) \cdot e^{j \cdot 0,5\beta \cdot r} \quad (12)$$

При переході в центральну систему координат і нормуванні (12) на  $\sin(0,5\beta r)/\text{tg}(0,5\beta)$  отримаємо

$$\psi_r(\zeta) \propto 1 + j 2\zeta \cdot \text{tg}(0,5\beta) \quad (13)$$

У відповідності з (13)  $\Delta\varphi = \arctg(2\zeta \cdot \text{tg}(0,5\beta)) - \beta\zeta$ , а з точністю до величин третього порядку малості

$$\Delta\varphi(\zeta) \approx \zeta \cdot (1 - 4 \cdot \zeta^2) \cdot \beta^3 / 12 \quad (14)$$

За умови, що  $\beta = 2\pi/z$ , (14) повністю збігається з (18) у [5] (для колового контактного варіанту ДК, якщо  $z_s = z_r = z$ ), де наведено досить докладний аналіз функційної залежності  $\Delta\varphi(\zeta)$  і показано, що в у прийнятих тут позначеннях  $\Delta\varphi(\zeta) = \Delta\varphi_{\max} \cdot \sin(2\pi\zeta)$ , де

$\Delta\varphi_{\max} = 2\beta^3 / 9\sqrt{3}$ . З викладеного випливає, що для зменшення методичної похибки ДК дугостаторного виконання необхідно, щоб ширина зубця ротора  $\gamma$  була кратною кутовій ширині зубця статора  $\alpha$  (тобто  $f = 0$ ), що на перший погляд суперечить головному висновку в [9] – "наявність незначної дисиметрії між структурами статора і ротора ДК значно покращує показники його вихідних характеристик". Річ у тому, що на роторі безконтактного ДК відсутня синусна сигнальна обмотка, а це вже не "незначна дисиметрія", а повна асиметрія між структурами статора і ротора. Легко показати, що за наявності синусної обмотки на зубцях ротора кількістю  $z_r$ , дисторсія, обумовлена наявністю дробової частки  $f$ , повністю анулюється і  $\Delta\varphi(\zeta)$  описується виразом (14), який повністю збігається з (20) у [9] при заміні  $\beta$  на  $k\beta/z_r$ , де  $k$  – найбільший спільний дільник чисел  $z_s$  і  $z_r$ .

Достовірність отриманих результатів експериментально підтверджена на макеті безконтактного ДК із параметрами:  $\alpha = 6$  кут. гр.; обмотки збудження статора – синусні і забезпечують дискретність фазового фактора зубців  $\beta = 6$  ел. гр.; ширина зубця ротора  $\gamma_1 = 9$  кут. гр. ( $r = 1; f = 0,5$ ) і  $\gamma_2 = 6,6$  кут. гр. ( $r = 1; f = 0,1$ ); сигнальна обмотка – концентрична, але (для уникнення впливу потоків розсіювання обмоток збудження) розташовувалася на зубцях ротора. Розбіжність між розрахунковими величинами за п'ятичленним рядом Фур'є і експериментальними не перевищувала 5%, що показано на рис. 13, де криві представлені у фізичних величинах – геом. і ел. град.

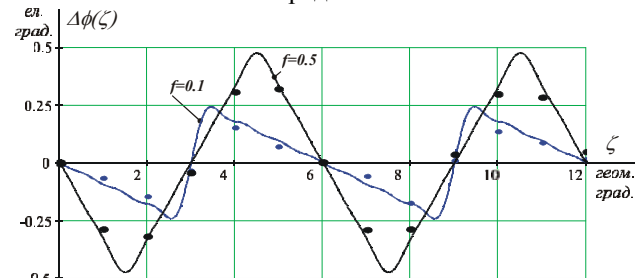


Рис.13. Порівняння розрахункових і експериментальних залежностей  $\Delta\varphi(\zeta)$  (— - розрахунок; ●●● - експеримент)

## ВИСНОВКИ

Запропонована модифікація топології магнітної системи індукційних перетворювачів інформації (та й енергії), яка названа магнітною системою трансверсного потоку, дозволяє реалізацію безконтактних давачів кута як циліндричного, так і дугостаторного конструкційних виконань. Її основними перевагами є:

- можливість функціонування як в амплітудному, так і фазовому режимах кодування вхідного кута;

- практично повна ануляція наслідків топологічної розімкненості у дугостаторних конструкціях як магнітопроводу, так і обмоток, тобто – осердевого і обмоткового краєвих ефектів;

- у дугостаторних конструкціях внаслідок топологічної розімкненості обмоток (сигнальних і збудження) з'являється можливість їх виконання з розрахунковою кількістю пар полюсів  $p < 1$ , що дозволяє зменшити ціну дискрети фазового фактора зубців, а відтак – методичну похибку кодування вхідного кута фазою вихідної е.р.с.;

- забезпечуючи безконтактну передачу сигналів збудження на ротор, давачі циліндричної конструкції характеризуються метрологічними показниками, що відповідають рівню кращих магнітних систем традиційного конструкційного виконання.

До основних недоліків слід зарахувати ускладнене виконання сигнальної системи у багатоканальному варіанті ( $m$ -фазному) і збільшення аксіального розміру конструкції проти традиційних магнітних систем.

## ПІСЛЯМОВА

У читача може виникнути несприйняття теоретичної частини цього викладу, де автор обійшовся без характерних для його робіт фізичних понять (хвильова функція, векторний магнітний потенціал тощо) і математичних операторів на кшталт  $\Delta \times$ ;  $\Delta \cdot$ ;  $\Delta^2$ , обмежившись простими геометричними викладеннями.

Це спровоковано наближенням 175-ої річниці відкриття М.Фарадеєм закону електромагнітної індукції та початку публікації його всесвітньо відомої серії "Експериментальні дослідження електрики" [6], де вперше було вжито термін "electro-tonic state" (ETS). На відзначення цієї дати автор вирішив провести експеримент: описати сучасний електромеханічний прилад, спираючись лише на ідеї і термінологію М.Фарадея. Наскільки це йому вдалося, вирішувати читачу, хоч автор усвідомлює, що експеримент – не зовсім чистий, бо кінцевий результат був відомим наперед.

Якщо запитати автора: "Що ж таке (який фізичний зміст) "electro-tonic state"?" – відповідь буде довгою і плутаною, бо кожен це розуміє по-своєму. Електротехнік – як векторні поля ( $E$ ,  $B$ ,  $H$  тощо); електромеханік – більше як вольт-секундну площу (інший невіданий термін – потокозчеплення  $\Psi$ ), або векторний магнітний потенціал  $A$ ; радіотехнік – як векторний потенціал Герца  $\Gamma$  [10]; фахівець у царині квантової механіки – як хвильову функцію Шредінгера  $\Psi$ . Кожен з них нормує вказані величини по-своєму: електромеханіки – на номінальні значення, функцію Шредінгера – на одиницю, бо трактують її як розподіл ймовірності енергетичного стану. Досліджуючи лише

фазові співвідношення. автору зручно було нормувати  $\Psi$  так, щоб  $\text{Re}(\Psi) = 1$ , бо тоді  $\varphi = \text{arctg}(\text{Im}(\Psi))$ .

Для з'ясування сутності ETS звернімося до записки М.Фарадея "Нові погляди ...", оприлюдненої лише 1938 року, де сказано [10]:

- "індукційні явища розповсюджуються в просторі з деякою швидкістю ..., як хвилі";

- "Я вважаю, що розповсюдження магнітних сил... подібне коливанню збуреної поверхні води" (Сіс! – поперечні хвилі (В.З.));

- "За аналогією я вважаю можливим застосувати теорію коливань до розповсюдження індукції".

Тепер побудуємо ланцюжок: ETS → поперечна хвиля → спектральний склад поперечної хвилі дискретний (квантований за геометричними параметрами об'єму її існування) → відтак енергія хвилі також квантована → отже квантованим є і енергетичний стан матеріального об'єкта → хвильове рівняння Шредінгера. Цей ланцюжок дискурсивних сентенцій (алюзія нитки Аріадни) веде до висновку: М.Фарадей стояв на порозі (якщо не брами, то, принаймні, хвіртки) до храму нерелятивістської квантової механіки.

Отже поняття ETS слід вважати фундаментальним поняттям сучасної електрофізики і насамкінець залишається лише погодитись із докором А.Г. Іосиф'яна, що електротехніка дещо "відірвалась від сучасної фізики, її найважливіших розділів – квантової механіки і квантової електрофізики" [6, 12].

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Bajorek Z. Elektromaszynowe elementy automatyki. - Warszawa; WNT, 1969. – 236 s.
- [2] Ахмеджанов А.А. Системы передачи угла повышенной точности. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 272 с.
- [3] 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.
- [4] Завгородній В.Д., Мороз В.І., Бойко А.С. Квантово-механічна модель ... Частина 5 // Електротехніка і електромеханіка, 2004, № 4. – С. 27-33.
- [5] Завгородній В.Д. Квантово-механічна модель ... Частина 1 // Там же. – 2002, № 2. – С. 80 – 85.
- [6] Боев В.М., Грибская Е.А., Лавриненко О.В. "Электроническое состояние" и закон электромагнитной индукции Фарадея // Електротехніка і електромеханіка, 2004, № 4. – С. 5 - 8.
- [7] Завгородній В.Д. Квантово-механічна модель давачів кута індукційного типу (Частина 3. Аналіз впливу технологічних похибок) // Електротехніка і електромеханіка. – 2003, № 3. – С. 26 - 31.
- [8] Хрушев В.В. Электрические микромашины автоматических устройств. – Л.: Энергия, 1976. – 384 с.
- [9] Завгородній В.Д. Квантово-механічна модель давачів кута індукційного типу. (Частина 2) // Електротехніка і електромеханіка. – 2003, № 2. – С.
- [10] Федоров Н.Н. Основы электродинамики. – М.: Высш. шк. 1965. – 328 с.
- [11] Баранов М.И. Джеймс Клерк Максвелл и теория электромагнитного поля // Електротехніка і електромеханіка, 2005, № 1.- С. 5 - 7.
- [12] Иосифьян А.Г. Эволюция физических основ электротехники и электродинамики // Электричество – 1989, № 9. – С. 16 – 26.

Надійшла 21.04.2005