

## ОСНОВИ ПРОЕКТНОГО РОЗРАХУНКУ ДАВАЧІВ ОБМЕЖЕНОГО КУТА ПОВОРОТУ З ТРАНСВЕРСНОЮ МАГНІТНОЮ СИСТЕМОЮ

Бойко А.С., Завгородній В.Д.

Національний університет "Львівська політехніка", СКБ електромеханічних систем  
Україна, 79000, м. Львів, вул. Ак. Колесси, 2, СКБ ЕМС  
тел./факс (032) 261-41-44, E-mail: snt68@polynet.lviv.ua

*Викладено методику проектного розрахунку індукційних давачів обмеженого кута повороту з магнітною системою трансверсного типу, яка дозволяє визначити геометричні розміри активної частини, структуру обмоток та їхні обмоткові дані залежно від заданих значень зовнішніх параметрів давача. Методика підтверджена результатами експериментальних досліджень вихідних характеристик давача.*

*Изложена методика проектного расчета индукционных датчиков ограниченного угла поворота с магнитной системой трансверсного типа, позволяющая определить геометрические размеры активной части, структуру обмоток и их обмоточные данные в зависимости от заданных значений внешних параметров датчика. Методика подтверждена результатами экспериментальных исследований выходных характеристик датчика.*

### ВСТУП

Цей виклад слід розглядати як практичну реалізацію запропонованих в [1] принципів побудови безконтактних індукційних давачів обмеженого кута повороту (ДК). Дія таких ДК, як і ДК класичної конструкції (на кшталт диференційного трансформатора [2], мікросина [3] тощо), базується на зміні коефіцієнтів взаємодуції між його обмоткою збудження та сигнальними обмотками залежно від кутової координати положення якоря. Застосування ж магнітної системи трансверсного типу [1] дозволяє майже на порядок розширити робочий діапазон вимірюваних кутів за повної відсутності реактивного моменту, бо якщо в ДК традиційної конструкції силові лінії магнітного потоку збудження розташовані в площинах нормальних до осі повороту якоря, то в ДК із трансверсною магнітною системою ці силові лінії розташовані в площинах, що проходять через вісь обертання.

У таких ДК обмотка збудження й сигнальні обмотки вкладаються в тангенційні пази магнітопроводу статора, а пасивний якорь виконано на кшталт "язичка". Найпростіша структура магнітної системи ДК трансверсного типу показана на рис. 1.

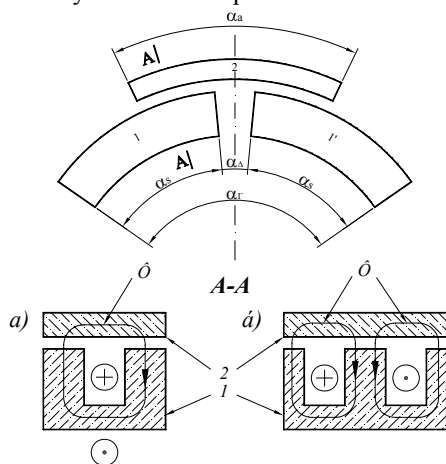


Рис. 1. Структура трансверсної магнітної системи ДК на базі II-подібних (а) і III-подібних осердь (б): 1 і 1' - сегменти осердя магнітопроводу статора; 2 - якорь

З огляду на частоту сигналів збудження, а відтак й інформаційних сигналів, значенням порядку 5 кГц ÷ 20 кГц, осердя магнітопроводів статора та якоря повинні виготовлятися з магнітом'якої фероєраміки.

Варіант розташування сигнальних (інформаційних) обмоток  $s_1$  і  $s_2$ , а також обмотки збудження  $f$ , у тангенційних пазах сегментів магнітопроводу статора ДК, що працює в амплітудному режимі, показано на рис. 2.

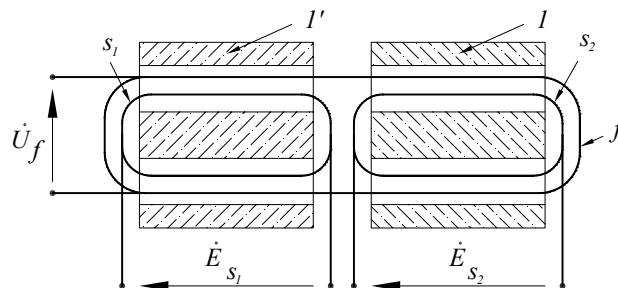


Рис. 2. Варіант конфігурації взаємного розташування обмоток збудження  $f$  і сигнальних  $s$

Фазовий режим роботи ДК можна отримати за умови живлення обмотки  $s_1$  та  $s_2$  (тепер вони стають обмотками збудження) від двох джерел синусоїдних напруг з деяким зсувом фази між ними (не обов'язково квадратурним) і використанні обмотки  $f$  як сигнальної, у фазі вихідної е.р.с. якої буде закодовано значення кутової координати якоря.

Ще один амплітудний режим роботи ДК має місце за з'єднання обмоток  $s_1$  і  $s_2$  послідовно-зустрічно й живлення їх від одного джерела синусоїдної напруги й використання обмотки  $f$  (як і в попередньому випадку) як інформаційної.

Таким чином, ДК трансверсного типу дає змогу створити гоніометричну систему, побудовану як на амплітудному, так і на фазовому принципах опрацювання інформації, але рамки обсягу статті змушують зупинитися на одному з них. Викладене далі стосується лише ДК, що працює в амплітудному режимі.

## ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ДК, ЩО ПРАЦЮЄ В АМПЛІТУДНОМУ РЕЖИМІ

Приступаючи до розроблення ДК, конструктор повинен мати інформацію про вхідні й вихідні параметри роботи ДК, головними з яких для амплітудного режиму є:

- робочий діапазон вимірювання кутів  $\pm\alpha_p$  (рад);
- амплітуда напруги збудження –  $U_f$  (В);
- допустима амплітуда струму збудження -  $I_f$  (А);
- частота напруги збудження –  $f$  (Гц), або  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  (рад/с);
- значення максимальної амплітуди інформаційних сигналів в робочому діапазоні зміни кута –  $U_{sm}$  (В);
- максимальний перепад амплітуд інформаційних сигналів у робочому діапазоні зміни кута –  $\Delta U_s$  (В).

### ДК УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

До недоліків двосегментних структур трансверсної магнітної системи слід зарахувати:

- наявність значних потоків розсіяння порівняно з робочим потоком у немагнітному проміжку між якорем і статором ДК, що суттєво зменшує інформаційну складову  $\Delta U_s$  е.р.с. сигнальних обмоток;
- завищене значення габаритного кута ДК порівняно з шириною робочого діапазону кутів  $2 \cdot \alpha_p$ .

Перший недолік усувається шляхом умикання послідовно з витками сигнальної обмотки додаткових компенсувальних витків  $w_k$ , навитих колінеарно виткам обмотки збудження, але в протилежному напрямку. А другий – тим, що магнітопровід статора виконується не двосегментним, а багатосегментним, як показано на рис. 3. Структура обмотки збудження залишається незмінною, як і на рис. 2, а розподіл витків сигнальних обмоток на сегментах магнітопроводу повинен мати приступкову форму, як показано на рис. 3б. За висоти приступу  $w$  (перепад кількості витків між суміжними сегментами) на крайніх сегментах магнітопроводу буде розташовано по  $w_m = w \cdot (n-1)$  витків, де  $n$  – кількість сегментів, а закон розподілу витків на сегментах описується виразом

$$w_{si} = w \cdot (n - i), \text{ де } i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

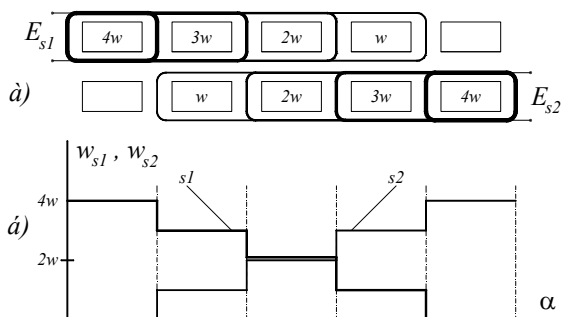


Рис. 3. Структура багатосегментного магнітопроводу статора (а) і закон розподілу витків сигнальних обмоток на сегментах (б)

Практично повністю усунути вплив магнітних потоків розсіяння на інформаційну місткість вихідних сигналів дає змогу структура приступкової обмотки,

яка показана на рис. 4. З огляду на дзеркальну симетрію її структури відносно площини  $\alpha = 0$  в подальшому будемо іменувати її "приступково-симетричною". Як за парних, так і непарних чисел  $n$  кількість витків на крайніх сегментах буде  $w_m = 0,5 \cdot w \cdot (n-1)$ , а закон розподілу витків на сегментах запишемо як

$$w_{si} = w \cdot (0,5 \cdot (n+1) - i), \text{ де } i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

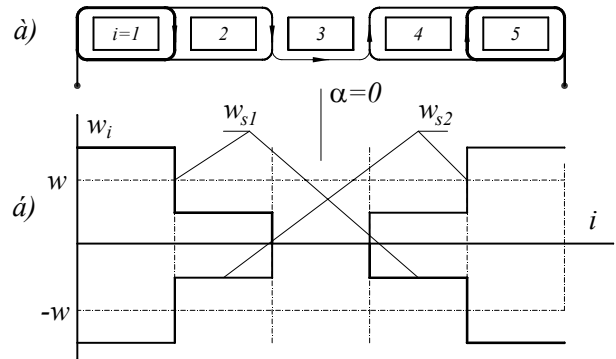


Рис. 4. Структура приступково-симетричної сигнальної обмотки (а) і закон розподілу її витків на сегментах (б)

До вад ДК із приступково-симетричною сигнальною обмоткою слід зарахувати відсутність інформаційного сигналу в нульовому положенні якоря ( $\alpha = 0$ ) та зміну фази сигналу при зміні знаку кута  $\alpha$ . Але, як і в попередньому випадку, ці вади усуваються застосуванням додаткових компенсувальних витків, колінеарних виткам обмотки збудження, але навитих у тому ж напрямку.

### ВИМОГИ ДО ФОРМ ФУНКЦІЙНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ВІД КУТА ПОВОРОТУ ТА РЕКОМЕНДОВАНИЙ ПРИНЦИП ВИЗНАЧЕННЯ КОДУ КУТА

Метод визначення цифрового коду кута ( $cod\alpha$ ) повинен бути нечутливим до можливих девіацій параметрів джерела збудження (до девіації амплітуди, частоти й фази  $U_f$ ), а також до температурного впливу навколишнього середовища з урахуванням тепловиділення у самому ДК. Це можна забезпечити оснастивши ДК двома сигнальними обмотками, які характеризуються формою функційної залежності їх амплітуд від кута  $\alpha$ , що показана на рис. 5, і яку в загальному випадку можна описати виразами

$$\begin{aligned} E_{s1}(\alpha) &= E_{av} + E(\alpha); \\ E_{s2}(\alpha) &= E_{av} - E(\alpha), \end{aligned} \quad (3)$$

де:  $E(\alpha)$  – інформаційна складова вихідних сигналів (непарна функція від значення  $\alpha$ );  $E_{av}$  – деяка постійна складова.

На рис. 5 позначено:  $E_{s\max}$  і  $E_{s\min}$  – максимальне і мінімальне значення амплітуд вихідних сигналів у робочому діапазоні кутів  $\pm\alpha_p$ . Тоді

$$E_{av} = 0,5 \cdot (E_{s\max} + E_{s\min}). \quad (4)$$

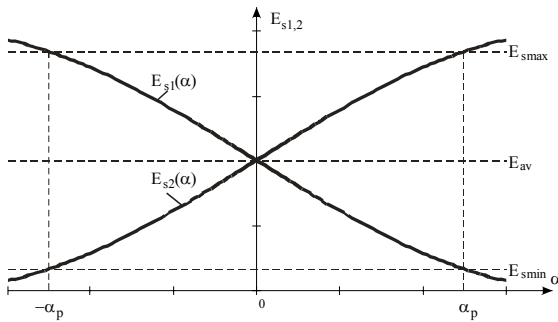


Рис. 5. Бажана форма функційних залежностей  $E_{s1}(\alpha)$  і  $E_{s2}(\alpha)$

Отже, загальна вимога до форми  $E_{s1}(\alpha)$  і  $E_{s2}(\alpha)$  – вони водночас повинні бути дзеркально симетричними відносно осі ординат і прямої  $E_{sav}$ .

Коефіцієнт інформаційної місткості вихідних сигналів  $\eta$  і цифровий код плинного значення кута  $\alpha$  ( $cod\alpha$ ) визначимо як

$$\eta = \frac{E_{smax} - E_{smin}}{E_{smax}} = 1 - \frac{E_{smin}}{E_{smax}}; \quad (5)$$

$$cod\alpha = \frac{E_{s1}(\alpha) - E_{s2}(\alpha)}{E_{s1}(\alpha) + E_{s2}(\alpha)} = \frac{E(\alpha)}{E_{av}}. \quad (6)$$

Як впливає з (6), цей підхід не реалізується, якщо  $E_{av} = 0$ , тобто за структури сигнальних обмоток, що на рис. 4, без наявності компенсувальних витків. Бажано, щоб конструкція ДК забезпечувала прямопропорційну залежність  $E(\alpha) = k \cdot \alpha$ , тоді  $\alpha \equiv cod\alpha \cdot E_{av} / k$ . В іншому разі значення кута  $\alpha$  потрібно буде визначати за функцією, зворотною до функції  $E(\alpha)$ , що реалізується шляхом використання програмованих логічних інтегральних схем.

#### ГОЛОВНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПАРАМЕТРИ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ДК І ЇХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ

Задля компактності подальшого викладу введемо такі параметри, що характеризують конструкцію магнітопроводу ДК в електромагнітному значенні і не залежать від конкретних значень кількості витків обмоток збудження ( $w_f$ ), сигнальних ( $w_s$ ) і компенсувальних ( $w_k$ ):

- $\lambda_{f\delta}$  і  $\lambda_{f\sigma}$  – магнітні провідності сегменту для поля самоіндукції обмотки збудження за наявності над ним ярка і без нього, відповідно;
- $\lambda_{s\delta}$  і  $\lambda_{s\sigma}$  – магнітні провідності сегменту для полів взаємодукції між обмотками  $f$  і  $s$  за наявності над ним ярка і без нього, відповідно;
- $\lambda_{k\delta}$  і  $\lambda_{k\sigma}$  – магнітні провідності сегменту для полів взаємодукції між обмотками  $f$  і  $k$  за наявності над ним ярка і без нього, відповідно.

Значення вказаних параметрів залежить як від геометричних розмірів конструкції магнітопроводу, так і від конфігурації взаємного розташування в просторі витків обмоток  $w$ ,  $s$ ,  $k$ ; вони розраховуються відомими в теорії електричних машин і апаратів методами. Вкажемо на характерний зв'язок між цими параметрами

$$\lambda_{f\delta} - \lambda_{f\sigma} = \lambda_{s\delta} - \lambda_{s\sigma} = \lambda_{k\delta} - \lambda_{k\sigma} = \lambda_{\delta}. \quad (7)$$

При функціонуванні багатосегментного ДК його магнітні системи в цілому характеризуються параметрами

$$\begin{aligned} \lambda_f &= \lambda_{f\delta} + (n-1) \cdot \lambda_{f\sigma} = \lambda_{\delta} + n \cdot \lambda_{f\sigma}; \\ \lambda_s &= \lambda_{s\delta} + (n-1) \cdot \lambda_{s\sigma} = \lambda_{\delta} + n \cdot \lambda_{s\sigma}; \\ \lambda_k &= \lambda_{k\delta} + (n-1) \cdot \lambda_{k\sigma} = \lambda_{\delta} + n \cdot \lambda_{k\sigma}. \end{aligned} \quad (8)$$

Внаслідок досить складної геометричної конфігурації полів розсіювання обмотки  $f$  точність розрахункових значень  $\lambda_{f\delta}(\sigma)$ ,  $\lambda_{s\delta}(\sigma)$  і  $\lambda_{k\delta}(\sigma)$  ДК, як метрологічного об'єкту, недостатня. Тому для практичних розрахунків значення цих параметрів краще встановити експериментальним шляхом, дослідивши макет, що складається з ярка та одного сегмента, в тангенціальний паз якого укладено три обмотки з кількістю витків кожної  $w_m$  ( $w_m = 10 \div 20$ ). Взаємне розташування цих обмоток повинно відповідати розташуванню обмоток  $f$ ,  $s$  і  $k$  у ДК, що проектується. За живлення однієї з обмоток (аналога обмотки  $f$ ) напругою  $U_{f\delta}(\sigma)$  і струмом  $I_{f\delta}(\sigma)$  і результатів виміру е.р.с. двох інших обмоток  $E_{s\delta}(\sigma)$  і  $E_{k\delta}(\sigma)$  у двох станах макету – з ярком (індекс  $\delta$ ) і без нього (індекс  $\sigma$ ), знехтувавши активними опорами обмоток, отримуємо

$$\begin{aligned} \lambda_{f\delta}(\sigma) &= \frac{U_{f\delta}(\sigma)}{\omega \cdot w_m^2 \cdot I_{f\delta}(\sigma)}; \quad \lambda_{s\delta}(\sigma) = \frac{E_{s\delta}(\sigma)}{\omega \cdot w_m^2 \cdot I_{f\delta}(\sigma)}; \\ \lambda_{k\delta}(\sigma) &= \frac{E_{k\delta}(\sigma)}{\omega \cdot w_m^2 \cdot I_{f\delta}(\sigma)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Перевірка значень  $\lambda$  за (9) на задоволення умови (7) засвідчує достовірність їх експериментального визначення.

Експериментальні значення параметрів  $\lambda_{f\delta}$  і  $\lambda_{f\sigma}$  можна визначити і на реальному ДК з відомими величинами  $n$  і  $w$ . Виміривши  $U_{f\delta}(\sigma)$  і  $I_{f\delta}(\sigma)$  при наявності ярка і без нього, обчисливши  $z_{f\delta}(\sigma) = U_{f\delta}(\sigma) / I_{f\delta}(\sigma)$  й узявши до уваги, що  $z_{f\delta} = \omega \cdot w_f^2 \cdot (\lambda_{f\delta} + (n-1) \cdot \lambda_{f\sigma})$  і  $z_{f\sigma} = n \cdot \omega \cdot w_f^2 \cdot \lambda_{f\sigma}$ , отримаємо

$$\begin{aligned} \lambda_{f\sigma} &= \frac{z_{f\sigma}}{n \cdot \omega \cdot w_f^2}; \quad \lambda_{f\delta} = \frac{n \cdot (z_{f\delta} - z_{f\sigma}) + z_{f\sigma}}{n \cdot \omega \cdot w_f^2}; \\ \lambda_{f\delta} - \lambda_{f\sigma} &= \lambda_{\delta} = \frac{n \cdot (z_{f\delta} - z_{f\sigma})}{n \cdot \omega \cdot w_f^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Що ж до параметрів  $\lambda_{s\delta}(\sigma)$  і  $\lambda_{k\delta}(\sigma)$ , то внаслідок гальванічного зв'язку між обмотками  $s$  і  $k$ , визначити їх експериментальним шляхом відокремлено не можна, але легко знайти значення їхньої різниці  $\lambda_{\delta} - \lambda_{\sigma}$ . Для цього досить визначити для однієї із сигнальних обмоток  $z_{s\sigma}$  і  $z_{s1\delta}$  та  $z_{s2\delta}$ , що відповідають положенню ярка над одним із крайніх сегментів магнітопроводу,

$$z_{s\sigma} = \frac{E_{s\sigma}}{I_{f\sigma}}; \quad z_{s1\delta} = \frac{E_{s1\delta}}{I_{f\delta}}; \quad z_{s2\delta} = \frac{E_{s2\delta}}{I_{f\delta}}. \quad (11)$$

Для сигнальної обмотки приступкової структури

$$\begin{aligned} z_{s\sigma} &= n \left( \frac{(n-1)}{2} w \cdot \lambda_{s\sigma} - w_k \cdot \lambda_{k\sigma} \right) \omega \cdot w_f; \\ z_{s1\delta} &= \left( w \left( (n-1) \lambda_{s\delta} + \frac{n-2}{2} \lambda_{s\sigma} \right) - w_k \cdot \lambda_k \right) \omega \cdot w_f; \\ z_{s2\delta} &= \left( \frac{n(n-1)}{2} w \cdot \lambda_{s\sigma} - w_k \cdot \lambda_k \right) \omega \cdot w_f. \end{aligned} \quad (12)$$

З (12) отримаємо:

$$\begin{aligned} \lambda_{s\delta} - \lambda_{s\sigma} &= \frac{z_{s1\delta} - z_{s2\delta}}{(n-1) \cdot \omega \cdot w \cdot w_f}; \\ \lambda_{k\delta} - \lambda_{k\sigma} &= \frac{z_{s2\delta} - z_{s\sigma}}{\omega \cdot w_k \cdot w_f}. \end{aligned} \quad (13)$$

Оскільки витки обмотки  $k$  розташовані поверх витків обмотки  $s$ , а  $w_k < w_{s \max}$ , то значення  $\lambda_{s\sigma}$  і  $\lambda_{k\sigma}$  досить близькі, тому покладемо  $\lambda_{k\sigma} = k \cdot \lambda_{s\sigma}$  ( $k \approx 0,95 \div 1,0$ ), а відтак на основі (12)

$$\lambda_{s\sigma} = \frac{2 \cdot z_{s\sigma}}{n \cdot \omega \cdot ((n-1) \cdot w - 2 \cdot k \cdot w_k) \cdot w_f}. \quad (14)$$

Параметри  $\lambda_{s\delta}$  і  $\lambda_{k\delta}$  тепер можна визначити за (13).

Для сигнальної обмотки приступково-симетричної структури маємо

$$\begin{aligned} z_{s\sigma} &= n \cdot \omega \cdot w_k \cdot w_f \cdot \lambda_{k\sigma}; \\ z_{s1\delta} &= \left( \frac{n-1}{2} \cdot w \cdot \lambda_{s\delta} + w_k \cdot \lambda_k \right) \cdot \omega \cdot w_f; \\ z_{s2\delta} &= \left( \frac{1-n}{2} \cdot w \cdot \lambda_{s\delta} + w_k \cdot \lambda_k \right) \cdot \omega \cdot w_f. \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{Тоді} \quad \lambda_{k\sigma} &= \frac{z_{s\sigma}}{n \cdot \omega \cdot w_k \cdot w_f}; \\ \lambda_{k\delta} &= \frac{z_{s1\delta} + z_{s1\sigma} - 2 \cdot z_{s\sigma} \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right)}{n \cdot \omega \cdot w_k \cdot w_f}. \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{s\delta} - \lambda_{s\sigma} &= \frac{z_{s1\delta} - z_{s2\delta}}{(n-1) \cdot \omega \cdot w \cdot w_f}; \\ \lambda_{k\delta} - \lambda_{k\sigma} &= \frac{z_{s2\delta} - z_{s\sigma}}{\omega \cdot w_k \cdot w_f}. \end{aligned} \quad (17)$$

Зауважимо, що (17), як і слід було очікувати, повністю збігається з (13).

Експериментально визначені  $\lambda_{f\delta(\sigma)}$ ,  $\lambda_{s\delta(\sigma)}$ ,  $\lambda_{k\delta(\sigma)}$  дають змогу зробити оцінку достовірності їх розрахункових значень і внести відповідні корективи до розрахунку обмоткових даних ДК.

#### ПОПЕРЕДНІЙ ГАБАРИТНИЙ КУТОВИЙ РОЗМІР ДК

Кутові розміри двосегментної конструкції ДК показані на рис. 1, де позначено:

-  $\alpha_{\Delta}$  – кутовий розмір технологічного проміжку для забезпечення можливості укладання обмоток;

-  $\alpha_a \geq 2 \cdot \alpha_p + \alpha_{\Delta}$  – мінімальне значення кутового розміру якоря;

-  $\alpha_s \geq 2 \cdot \alpha_p + \alpha_{\Delta}$  – кутовий розмір кожного сегменту.

Відповідно до рис. 1 габаритний кутовий розмір  $\alpha_{\Gamma}$  двосегментного ДК повинен задовольняти умові

$$\alpha_{\Gamma} > 2 \cdot (2 \cdot \alpha_p + \alpha_{\Delta}) \quad (18)$$

Для багатосегментних структур ДК ( $n > 2$ ) співвідношення між тангенціальними розмірами запишемо як

$$\alpha_a = \frac{2 \cdot \alpha_p + \alpha_{\Delta}}{n}; \quad \alpha_s = \alpha_a - \alpha_{\Delta}. \quad (19)$$

З урахуванням (19) габаритний розмір багатосегментного ДК складає

$$\alpha_{\Gamma} > 2 \cdot \alpha_p + \frac{2 \cdot \alpha_p + \alpha_{\Delta}}{n} \approx 2 \cdot \alpha_p \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right). \quad (20)$$

#### ОБМОТКОВІ ДАНІ СТАТОРА ДК

Відповідно до рекомендованого принципу визначення цифрового коду кута, ДК повинен облаштуватися двома сигнальними обмотками, взаємна структура яких характеризується дзеркальною симетрією відносно меридіанної площини, тому в подальшому мова йтиме про одну з них. За основний параметр обмоток доцільно прийняти висоту приступку  $w$ , тоді закони розподілу витків на сегментах магнітопроводу статора визначатимуться за (1) або (2).

За вихідні передумови для розрахунку значень  $w_f$ ,  $w$  і  $w_k$  прийнято:

1) форма функційних залежностей  $E_s(\alpha)$  повинна відповідати показаній на рис. 5, тобто  $E_{s \min} > 0$ , що як для приступкової, так і приступково-симетричної структур сигнальних обмоток вимагає наявності компенсувальних витків  $w_k$ ;

2) на робочому діапазоні зміни кутів величина  $E_{s \max}$  не повинна перевищувати  $U_{sm}$ , задане значення якої визначається типом вибраних АЦП контролера;

3) для збільшення інформаційної місткості вихідних сигналів приймемо значення максимального перепаду амплітуд на робочому діапазоні  $\Delta U_s = k \cdot U_s$ , де  $k = 0,9 \div 0,95$  (тобто  $\eta \approx k$ );

4) компенсувальні витки сигнальних обмоток  $w_k$  повинні забезпечити значення

$$E_{av} = 0,5 \cdot (E_{s \max} + E_{s \min}) = 0,5 \cdot U_{sm};$$

5) кількість витків обмотки збудження  $w_f$  визначається з умови забезпечення заданих  $U_f$  й  $I_f$ .

**Кількість витків обмотки збудження**, структура якої не залежить від структури сигнальних обмоток, за умовою 5) визначимо з рівняння (за нехтуванням активним опором)

$$U_f = \omega \cdot (\lambda_{f\delta} + (n-1) \cdot \lambda_{f\sigma}) \cdot w_f^2 \cdot I_f, \quad (21)$$

відповідно до якого

$$w_f = \sqrt{\frac{U_f}{\omega \cdot \lambda_{f\sigma} \cdot I_f}}. \quad (22)$$

Для наступного визначення кількості компенсуювальних витків сигнальних обмоток статора в нагоді може вираз для е.р.с. обмотки  $f_s$ , що припадає на один її виток  $e_f = U_f / w_f$

$$e_f = \sqrt{\omega \cdot \lambda_f \cdot U_f \cdot I_f}. \quad (23)$$

**Кількість витків сигнальної обмотки приступкової структури** визначимо з рівнянь

$$E_{s\max} = \omega \cdot w_f \left( w \left( (n-1)\lambda_{s\delta} + \lambda_{s\sigma} \sum_{i=1}^{n-2} i \right) - w_k \cdot \lambda_k \right) I_f =$$

$$= \omega \cdot w_f \left( w(n-1) \left( \lambda_{s\delta} + \frac{\lambda_{s\sigma}}{2} \right) - w_k \cdot \lambda_k \right) I_f;$$

$$E_{s\min} = \omega \cdot w_f \left( w \cdot \lambda_{s\delta} \sum_{i=1}^{n-1} i - w_k \cdot \lambda_k \right) I_f =$$

$$= \omega \cdot w_f \left( \frac{n \cdot (n-1)}{2} w \cdot \lambda_{s\delta} - w_k \cdot \lambda_k \right) I_f. \quad (25)$$

Тоді

$$\Delta U_s = E_{s\max} - E_{s\min} = \omega \cdot w \cdot w_f \cdot (n-1) \cdot \lambda_{s\delta} \cdot I_f. \quad (26)$$

Поділивши (26) на (21) і прийнявши до уваги передумову 3), отримаємо  $k \cdot \frac{U_{sm}}{U_f} = (n-1) \cdot \frac{w}{w_f} \cdot \frac{\lambda_{s\delta}}{\lambda_f}$ , що дає змогу визначити висоту приступки сигнальної обмотки приступкової структури

$$w = k \cdot \frac{w_f}{n-1} \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_{s\delta}} \cdot \frac{U_{sm}}{U_f}. \quad (27)$$

Виходячи з передумови 4) з урахуванням (24) і (25) запишемо

$$U_{sm} = \omega \cdot w_f \cdot (w \cdot (n-1) \cdot \lambda_s - 2 \cdot w_k \cdot \lambda_k) \cdot I_f. \quad (28)$$

З урахуванням (21) і (27) отримаємо

$$w_k = \frac{w_f}{2} \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_k} \cdot \left( k \cdot \frac{\lambda_s}{\lambda_{s\delta}} - 1 \right) \cdot \frac{U_{sm}}{U_f}. \quad (29)$$

**Кількість витків сигнальної обмотки приступково-симетричної структури** визначимо з рівнянь

$$E_{s\max} = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot w_f \left( \frac{n-1}{2} \cdot \lambda_{s\delta} \cdot w + w_k \cdot \lambda_k \right) I_f;$$

$$E_{s\min} = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot w_f \left( \frac{1-n}{2} \cdot \lambda_{s\delta} \cdot w + w_k \cdot \lambda_k \right) I_f. \quad (30)$$

Як і слід було сподіватися, значення  $\Delta U_s$  за (30) збігається з виразом (26), а тому висота приступки  $w$  цієї обмотки теж визначається за (27). Але якщо  $n$  – число парне, то і число  $w$  для цієї обмотки повинно бути парним. Передумова 4) для обмотки приступково-симетричної форми дає

$$U_{sm} = \omega \cdot w_f \cdot w_k \cdot \lambda_k \cdot I_f, \quad (31)$$

тоді

$$w_k = \frac{w_f}{2} \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_k} \cdot \frac{U_{sm}}{U_f}. \quad (32)$$

## ВИСНОВКИ

Запропонована раніше [1] модифікація топології магнітної системи індукційних перетворювачів інформації (названа магнітною системою трансверсного типу) легко надається до проектного розрахунку за умови точно означених зовнішніх параметрів давача кута (напруги й струму збудження та їхньої частоти) та вихідних параметрів (максимальне та мінімальне значення вихідних сигналів у робочому діапазоні кутів повороту).

Уведені в цьому викладі електромагнітні параметри магнітної системи давача кута  $\lambda_{f\delta(\sigma)}$ ,  $\lambda_{s\delta(\sigma)}$  і  $\lambda_{k\delta(\sigma)}$  легко визначаються розрахунковим й експериментальним шляхами й адекватно описують функційні залежності вихідних сигналів від кута повороту. Встановлення факту залежності цих сигналів переважно від параметра  $\lambda_{\delta} = \lambda_{s\delta} - \lambda_{s\sigma}$  (значення якого досить точно визначається розрахунково, бо він не чутливий до похибок розрахунку магнітних провідностей для потоків розсіяння), забезпечує точне визначення показників давача кута як первинного перетворювача інформації.

Рекомендований метод визначення цифрового коду кута забезпечує нечутливість гоніометричної системи до таких зовнішніх впливів, як нестабільність параметрів джерела збудження та впливу температури навколишнього середовища.

Приклад проектного розрахунку давача кута за запропонованою методикою наведена в Додатку.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Завгородній В.Д. Квантово-механічна модель давачів кута індукційного типу (Частина 6. Безконтактні давачі обмеженого кута повороту) // Електротехніка і електромеханіка. 2005. №4. – С. 45–50.
- [2] Пульер Ю.М. Индукционные электромеханические функциональные преобразователи. – М.: Энергия, 1969. – 112 с.
- [3] Ахмеджанов А.А. Системы передачи угла повышенной точности. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 272 с.
- [4] Vajorek Z. Electromaszynowe elementy automatiki. – Warszawa: WNT, 1969. – 236 s.

## ДОДАТОК

### ПРИКЛАД ПРОЕКТНОГО РОЗРАХУНКУ ДК З ТРАНСВЕРСНОЮ МАГНІТНОЮ СИСТЕМОЮ

Ефективність запропонованої методики покажемо на прикладі проектного розрахунку давача кута, вмонтованого в двигун поворотно-коливального руху на кут  $\pm 30$  геом. град.

#### Вихідні дані для розрахунку:

$$\alpha_p = \pm 0,522 \text{ рад}; U_f = 5 \text{ В}; I_f \leq 0,10 \text{ А};$$

$$f = 2 \cdot 10^4 \text{ Гц} \quad (\omega = 4 \cdot \pi \cdot 10^4 \text{ рад/с});$$

$$U_{sm} = 3,0 \text{ В}; \Delta U_s = 2,7 \text{ В}.$$

#### Вибір конструкції та результати макетування.

Двигун, у який вмонтовується давач кута, дає змогу виконати розточку його статора радіусом  $R_1 = 64$  мм, значення проміжку між якорем і статором покладемо  $\delta = 1,7$  мм, тоді зовнішній радіус якоря  $R_2 = 62,3$  мм. Технологічний проміжок для укладан-

ня сигнальних обмоток  $\Delta = 3$  мм ( $\alpha_{\Delta} \approx 0,05$  рад). Оскільки конструкція двигуна не накладає обмежень на кутовий габаритний розмір ДК, приймаємо кількість сегментів статора  $n = 2$ , тоді відповідно до (18) і (19)  $\alpha_a = 1,1$  рад,  $\alpha_s = 1,12$  рад,  $\alpha_{\Gamma} = 2,2$  рад, довжина дуги сегменту  $l_s = \alpha_s \cdot R_1 = 71,7$  мм. Сегмент формується з П-подібних феритових осердь марки МН2000 (ПП 15x11x6 з розмірами, вказаними на рис. 1д). Для експериментального визначення електромагнітних параметрів був виготовлений лінійний макет ДК у складі якоря й сегменту, в поздовжній паз якого було вкладено три обмотки (аналогі обмоток  $f, s$  і  $k$ ) із взаємним розташуванням, показаним на рис. 1д. Експериментальні значення параметрів  $\lambda_{f\delta(\sigma)}, \lambda_{s\delta(\sigma)}$  і  $\lambda_{k\delta(\sigma)}$  наведені в таблиці.

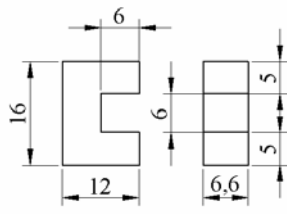


Рис. 1д

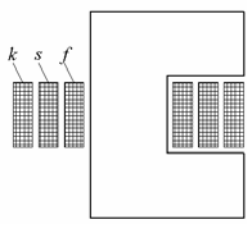


Рис. 1д

**Проектні обмоткові дані.** Для основного варіанту ( $n = 2$ ) за (22)

$$w_f = \sqrt{\frac{5}{4 \cdot \pi \cdot 10^4 \cdot (0,45 + 0,35) \cdot 10^{-6} \cdot 0,1}} = 23;$$

Кількість витків сигнальної обмотки приступкової структури за (27)

$$w_s = w = 0,9 \cdot \frac{23}{2-1} \cdot \frac{0,35 + 0,45}{0,37 - 0,27} \cdot \frac{3}{5} = 77.$$

Кількість компенсаційних витків для сигнальної обмотки приступкової структури за (29)

$$w_k = \frac{23}{2} \cdot \frac{0,35 + 0,45}{0,33 + 0,23} \cdot \left( 0,9 \cdot \frac{0,37 + 0,27}{0,37 - 0,27} - 1 \right) \frac{3}{5} = 35.$$

Для обмотки приступково-симетричної структури відповідні кількості витків складатимуть  $w_f = 23; w_s = 0,5 \cdot w = 38; w_k = 10$ .

Проектні обмоткові дані для ( $n = 3,4,5$ ) наведені в таблиці.

На рис. 2д показано порівняння розрахункових вихідних характеристик з експериментальними характеристиками давача кута з параметрами  $\alpha_p = \pm 30^\circ; U_f = 5,1$  В;  $I_f = 0,102$  А;  $w_f = 23$ ; сигнальні обмотки приступкової структури  $n = 2, w = 76, w_k = 35$ .

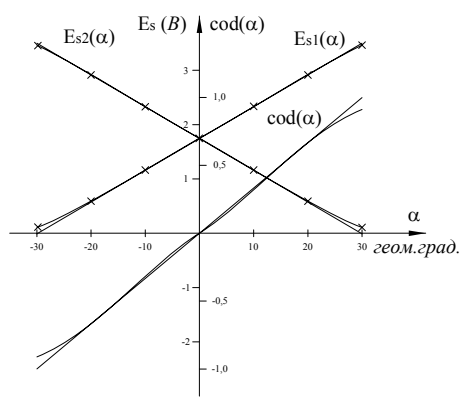


Рис. 2д. Розрахункові та експериментальні залежності  $E_{s1(2)}(\alpha); \text{cod}\alpha$ : — розрахунок;  $\times \times \times$  — експеримент

Таблиця

Параметри		Кількість сегментів $n$					
		2	3	4	5		
Геометричні параметри (рад)	$\alpha_s$	1,10	0,35	0,273	0,20		
	$\alpha_a$	1,12	0,37	0,275	0,22		
	$\alpha_{\Gamma}$	2,20	1,40	1,31	1,26		
Електромагнітні параметри* (мкГн)	$\lambda_{f\sigma}$	0,35	0,24	0,18	0,15		
	$\lambda_{f\delta}$	0,45	0,31	0,23	0,19		
	$\lambda_f$	0,80	0,79	0,78	0,79		
	$\lambda_{s\sigma}$	0,25	0,17	0,13	0,11		
	$\lambda_{s\delta}$	0,35	0,25	0,19	0,15		
	$\lambda_s$	0,60	0,59	0,59	0,59		
	$\lambda_{k\sigma}$	0,23	0,15	0,11	0,09		
	$\lambda_{k\delta}$	0,33	0,22	0,17	0,14		
	$\lambda_k$	0,56	0,52	0,50	0,50		
Обмоткові дані	Обм. $f$	$w_f$	23	23	23	23	
		$w$	77	62	53	42	
	Сигнальна обмотка приступкової структури	$w_k$	35	62	72	81	
		$w_{s1}$	77	124	159	168	
		$w_{s2}$	0	62	106	126	
		$w_{s3}$		0	53	84	
		$w_{s4}$			0	42	
		$w_{s5}$				0	
		Сигнальна обмотка приступково-симетричної структури	$w$	76	62	52	48
			$w_k$	10	10	10	10
	$w_{s1}$		38	62	78	96	
	$w_{s2}$		-38	0	26	48	
	$w_{s3}$			-62	-26	0	
	$w_{s4}$				-78	-48	
	$w_{s5}$					-96	

\* Розрахункові дані електромагнітних параметрів відрізняються від експериментальних, що наведені в Таблиці, на  $\pm 5\%$ .

Надійшла 03.03.2008