



16. *Титко О.І.* Експлуатаційний контроль залишкового ресурсу обмоток статора електрогенераторів//Збірник наукових статей "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин". Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона. — 2006. — С. 273–276.

17. *Титко В.А.* Влияние темпов инновационного развития энергомашиностроения на оптимальную политику об-

новления электростанций//Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. № 2 (5). — Київ. — 2003. — С. 101–105.

18. *Титко В.А.* Методика решения задач поиска оптимальной стратегии модернизации, замены и ремонта оборудования в электроэнергетике//Техн. електродинаміка. — 2001. — № 4. — С. 45–50.

© Титко А.И., Ахременко В.Л., 2011



УДК 621.313.322

ЛЕВИЦЬКИЙ А.С., канд. техн. наук,
Ін-т електродинаміки НАН України, м. Київ

КОНТРОЛЬ СТАНУ СТИКІВ СКЛАДЕНОГО СТАТОРА ПОТУЖНОГО ГІДРОГЕНЕРАТОРА ДВОКАНАЛЬНИМ ЄМНІСНИМ СЕНСОРОМ



Запропоновано двоканальний ємнісний сенсор для контролю стану стиків секторів складеного статора потужного гідрогенератора. Наведено аналітичні вирази для вимірювальних характеристик каналу лінійних переміщень та каналу кута перекосу. Проаналізовано похибки вимірювання каналів. Описана методика розрахунку середнього зазору в стикі за вимірними даними каналів сенсора.

Однією з необхідних умов достовірного контролю стиків секторів складеного статора гідрогенератора є визначення конфігурації зазору по всьому перетину стиків та його середньої величини, оскільки саме середня величина зазору впливає на рівень вібрації статора [1, 2]. Зрозуміло, що в зібраному у кільце статора середня величина зазору між суміжними секторами залежить від їх зсуву в тангенціальному напрямку та перекосів по висоті і ширині. Величину тангенціального зсуву та його перекосів по висоті можна визначити з використанням пристрою, описаного в [3]. Для цього необхідно встановити два пристрої на краях стиків по висоті і виміряти тангенціальний зсув. При наявності перекосу по висоті середній зазор визначиться як напівсума вимірних зсувів. Перекосів же суміжних секторів в радіальному напрямку вказаними пристроями виміряти не можна.

Ця проблема може бути вирішена шляхом використання пристрою, за допомогою якого можна одночасно вимірювати і лінійний тангенціальний зсув, і перекосів. Одночасне вимірювання вказаних параметрів було реалізовано у двокоординатному ємнісному пристрої, схема якого показана на Рис. 1 [4, 5].

Основними конструкційними частинами в ньому є дві плоскі діелектричні пластини 1 і 2, у яких на поверхнях, повернутих одна до одної, розміщені електроди 3.1–3.3, 4.1–4.3 і 5.1–5.3 ємнісного сенсора лінійних переміщень та електроди 6.1, 6.2, 7.1 і 7.2 ємнісного сенсора кутових переміщень (перекосу) [5].

Вимірювання лінійних переміщень (коли пластини 1 і 2 зміщуються одна відносно іншої в напрямку осі X) здійснюється сенсором, який являє собою багатоелектродний диференціальний конденсатор зі змінною площею, в якому: 3.1–3.3 – загальні електроди, а 4.1–4.3 і 5.1–5.3 – диференціальні. Електроди 3.1–3.3, 4.1–4.3 і 5.1–5.3, які виконані у вигляді паралельних смужок, з'єднуються між собою в групи. Сумарна ємність між електродами 3.1–3.3 і 4.1–4.3 дорівнює C_1 , а між 3.1–3.3 і 5.1–5.3 – C_2 . З'єднання електродів у групи по N електродів дозволяє збільшити чутливість сенсорів (на Рис.1 кількість електродів $N = 3$).

Диференціальний конденсатор зі змінним зазором, створений з використанням електродів 6.1, 7.1, 6.2 і 7.2 вимірює відносне кутове переміщення ϕ пластин 1 і 2. Складові частини диференціального конденсатора – ємності C_3 (між електродами 6.1 і 7.1) та C_4 (між електродами 6.2 і 7.2).

В початковому положенні сенсора, тобто коли відсутнє лінійне і кутове переміщення (Рис. 1, а), величина електричних ємностей складових частин сенсора лінійних переміщень C_1 і C_2 визначиться як

$$C_1 = C_2 = N\epsilon_0\epsilon(la/2d), \quad (1)$$

а ємностей C_3 і C_4 сенсора кутових переміщень як

$$C_3 = C_4 = \epsilon_0\epsilon(S/d), \quad (2)$$

де ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму ($8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); ϵ – відносна діелектрична проникність середовища між електродами; l – до-

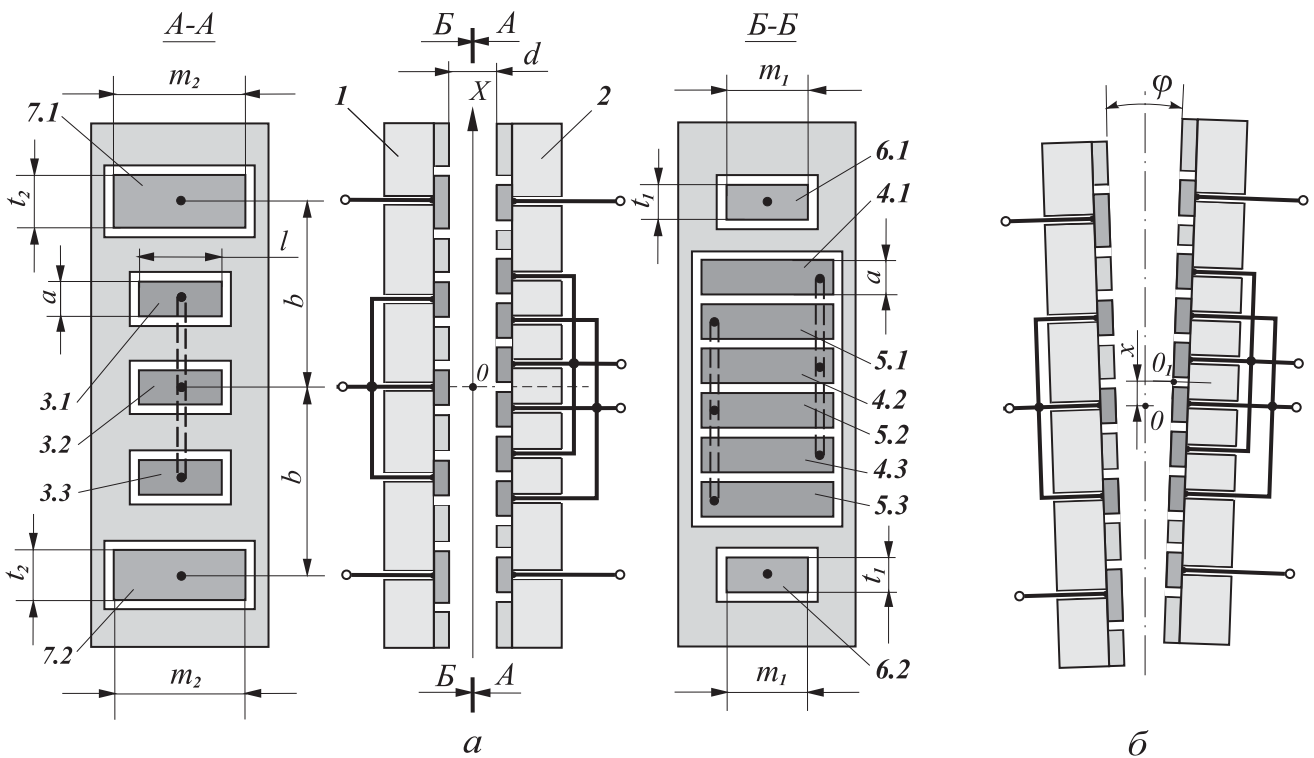


Рис. 1. Схема ємнісного пристрою для вимірювання переміщень по двох координатах: 1, 2 – діелектричні пластини; 3.1–3.3, 4.1–4.3, 5.3–5.3 – електроди ємнісного сенсора лінійних переміщень, 6.1, 7.1, 6.2, 7.2 – електроди сенсора кутових переміщень.

вжина стрічкових електродів 3.1–3.3 (перпендикулярно осі X); a – ширина стрічкових електродів 3.1–3.3 (уздовж осі X); d – відстань між поверхнями електродів; N – кількість елементарних диференціальних конденсаторів; $S = t_1 m_1$ – активна площа перекриття електродів 6.1 і 7.1, 6.2 і 7.2; t_1, m_1 – розміри електродів 6.1 і 6.2.

Для забезпечення одночасного вимірювання як лінійного переміщення x , так і кутового переміщення φ , необхідно виконати умову, яка задає нерівність

$$(t_2 - t_1)/2 > x_{\max}, \quad (3)$$

де t_2 – розмір електродів 7.1 і 7.2 в напрямку осі X, x_{\max} – максимальне переміщення по осі X від нульового положення. В такому випадку зберігається перекриття по площі електродів 6.1 і 7.1, 6.2 і 7.2.

При появі взаємного лінійного зсуву x і кута нахилу φ між пластинами 1 і 2 (Рис. 1, б) вирази (1) і (2) відповідно перетворюються в вирази (4, 5):

$$C_1 = N \epsilon_0 \epsilon_r \frac{l}{d} \left(\frac{a}{2} + x \right), \quad C_2 = N \epsilon_0 \epsilon_r \frac{l}{d} \left(\frac{a}{2} - x \right); \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d - b \varphi}, \quad C_4 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d + b \varphi}; \quad (5)$$

де b – відстань між серединами пластин (точка O) та центрами електродів 6.1, 6.2, 7.1 і 7.2. (Для спрощення математичних викладок припустимо, що вісь обертання O знаходиться посередині між пластинами 1 і 2. Це не накладає строгих обме-

жень на конструкцію перетворювача при діапазоні вимірюваних кутів φ до одиниць кутових хвилин).

Як відомо [5, 6], оптимальним з точки зору досягнення мінімальної нелінійності та мінімального впливу дестабілізуючих факторів є застосування диференціального ємнісного сенсора з функцією перетворення

$$p = (C_a - C_b)/(C_a + C_b), \quad (6)$$

де p – вихідний параметр пристрою; C_a і C_b – диференціальні ємності датчика. При підстановці значень $C_1 - C_4$ з формул (4), (5) в (6) одержимо значення вихідних параметрів p_1 та p_2 лінійного і кутового каналів сенсора

$$p_{10} = 2x/a, \quad x = (a/2)p_{10}, \quad p_{20} = b\varphi/d, \quad \varphi = (d/b)p_{20}. \quad (7)$$

Як видно з (7), функції перетворення кожного з сенсорів є прямо пропорційними стосовно лінійного переміщення x і кута перекосу φ відповідно. Але очевидно, що вирази для реальних функцій перетворення каналів будуть відмінні від виразів (7) через наявність методичних похибок. Аналіз розробленої структури сенсора з урахуванням функції перетворення вимірювального пристрою дозволив зробити висновок про те, що основні похибки вимірювання будуть виникати через наступні фактори: взаємного впливу каналів вимірювання, крайових ефектів, зсуву осі обертання (нахилу) пластин сенсора. При цьому перший з них зводиться фактично до впливу кутового переміщення на вихідний параметр каналу



вимірювання лінійного переміщення. Зворотний вплив практично відсутній, оскільки активна площа перекриття електродів каналу виміру кута не змінюється у всьому діапазоні вимірювання лінійного переміщення. Це забезпечується необхідними співвідношеннями (нерівність (3)) конструктивних розмірів електродів 6.1 (6.2) і 7.1 (7.2) сенсора кутових переміщень. До того ж методична похибка від непаралельності електродів сенсора кутових переміщень при вибраних його параметрах є такою, що нею можна знехтувати [7].

Похибки вимірювання сенсорів лінійного та кутового переміщень. Для оцінки впливу похибок необхідно отримати вирази для вихідних параметрів обох каналів p_1 та p_2 в залежності від параметрів вказаних похибок.

Спочатку оцінимо вплив каналу кутових переміщень на канал лінійних переміщень, знехтувавши крайовими ефектами (враховуючи задану достатньо невелику точність вимірювання і геометричні параметри сенсора).

На Рис. 2 показана схема електродів сенсора лінійних переміщень, в якому виник перекоєс на кут φ . Як відомо [7], при взаємному перекоєсі на кут φ прямокутних електродів ємнісного сенсора їх ємність визначається формулою

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{l}{\varphi} \ln \frac{h_{1i}}{h_{2i}}, \quad (8)$$

де h_{1i} і h_{2i} ($i = 1, 2, 3$) – довжини перпендикулярів, опущених з найбільш та найменш віддаленої точки кожного із електродів 3.1–3.3 на поверхню протилежних електродів 4.1–4.3 і 5.1–5.3.

Використовуючи формулу (8), знайдемо величини ємностей для кожного елементарного сенсора лінійних переміщень, виходячи з початкового значення зазору d , лінійного переміщення x , кута перекоєсу φ та відстанню q від умовної осі обертання O на кут φ (Рис. 2).

Ємності $C_{1.1}$ (між електродами 3.1 і 4.1) і (між електродами 3.1 і 4.2)

$$C_{1.1} = \epsilon_0 \epsilon \frac{l}{\varphi} \ln \frac{d + q\varphi + \frac{a}{2}\varphi}{d + q\varphi - x\varphi};$$

$$C_{1.2} = \epsilon_0 \epsilon \frac{l}{\varphi} \ln \frac{d + q\varphi - x\varphi}{d + q\varphi - \frac{a}{2}\varphi}, \quad (9)$$

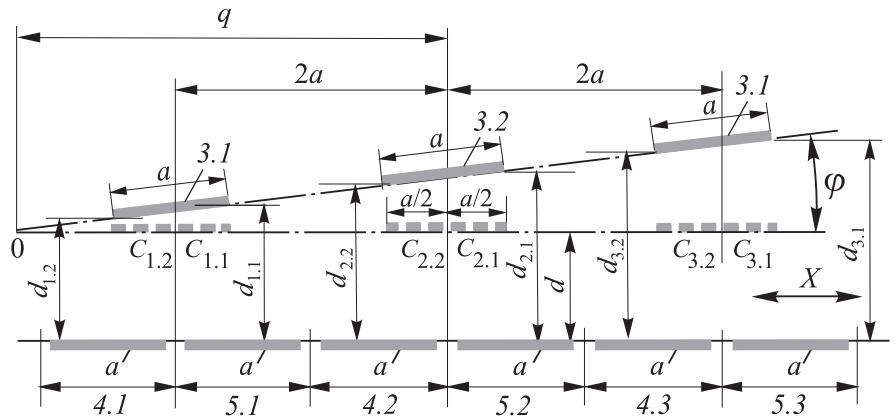


Рис. 2. Схема для розрахунку впливу каналу вимірювання кутових переміщень φ на функцію перетворення сенсора лінійних переміщень

Ємності $C_{2.1}$ (між електродами 3.2 і 4.2) і $C_{1.2}$ (між електродами 3.2 і 5.2)

$$C_{2.1} = \epsilon_0 \epsilon \frac{l}{\varphi} \ln \frac{d + q\varphi + \frac{5}{2}a\varphi}{d + q\varphi + 2a\varphi - x\varphi};$$

$$C_{2.2} = \epsilon_0 \epsilon \frac{l}{\varphi} \ln \frac{d + q\varphi + 2a\varphi - x\varphi}{d + q\varphi + \frac{3}{2}a\varphi}. \quad (10)$$

Ємності $C_{3.1}$ (між електродами 3.2 і 4.2) і (між електродами 3.2 і 5.2)

$$C_{3.1} = \epsilon_0 \epsilon \frac{l}{\varphi} \ln \frac{d + q\varphi - \frac{3}{2}a\varphi}{d + q\varphi - 2a\varphi - x\varphi};$$

$$C_{3.2} = \epsilon_0 \epsilon \frac{l}{\varphi} \ln \frac{d + q\varphi - 2a\varphi - x\varphi}{d + q\varphi - \frac{5}{2}a\varphi}. \quad (11)$$

В формулах (9) – (11) q – відстань від умовної осі обертання O до середини електрода 3.2.

Значення C_1 і C_2 диференціальних ємностей і визначаються як сума відповідних ємностей секцій $C_1 = C_{1.1} + C_{2.1} + C_{3.1}$; $C_2 = C_{2.1} + C_{2.2} + C_{3.1}$. (12)

Підставимо вирази (4.24) – (4.26) і (4.27) в (4.21). Враховуючи, що для $[-1 < x_1 \leq 1]$ [8]

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots, \quad (13)$$

одержимо

$$P_{1.1} = \frac{\left[\frac{2x}{a} - \frac{\varphi}{6aq} \left(\frac{3}{2}a^2 - 12q\varphi - 6x^2 \right) \right]}{\left[1 - \frac{3\varphi d}{2} + \frac{\varphi^2}{4d^2} (4q^2 + 11a^2) \right]}, \quad (14)$$

Оскільки значення q досить мале (вісь обертання може проходити або всередині пластин сенсора, або недалеко від краю, тобто $q \leq 10a$), то мультиплікативна похибка, що викликана відмінністю знаменника в (14) від одиниці, не переви-



ще 1–1,5 %. Якщо знехтувати цією похибкою, то вираз (14) матиме вигляд

$$p_{1.1} = \frac{2x}{a} - \frac{\varphi a}{4d} + \frac{x^2 \varphi}{ad} - \frac{2qx\varphi}{ad}. \quad (15)$$

Тоді величина похибки вимірювання каналу лінійних переміщень $\delta_{1.1}$, яка зумовлена впливом каналу кутових переміщень, буде рівною

$$\delta_{1.1} = \frac{p_{1.0} - p_{1.1}}{p_{1.0}} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Якщо q є близькою до нуля, похибка $\delta_{1.1}$ є адитивною. Якщо $q = 0$, то значення цієї похибки практично лінійно (з відхиленням не більше $\pm 1,5\%$) залежить від значення кута φ і може бути легко визначене аналітично та експериментально.

Ця похибка може бути легко скомпенсована, зокрема, алгоритмічним способом в комп'ютері, оскільки значення кута нахилу φ вимірюється другим каналом сенсора. Однак зі збільшенням q залежність похибки розглянутого виду від значення кута φ стає більш нелінійною. Для її компенсації будуть необхідні складні способи та алгоритми.

Для розрахунку впливу крайових ефектів на функцію перетворення каналу лінійного переміщення використаємо результати, отримані в роботі [6]. В зв'язку з тим, що крайові ефекти змінюють величини ємностей сенсора, то вихідний параметр $p_{1.2}$ буде відрізнятись від ідеального параметру $p_{1.0}$, який вираховується за формулою (7). Згідно [6]

$$p_{1.2} = \frac{\frac{6\pi x}{a} + 11 \left\{ \begin{array}{l} \ln \left[1 + \exp \left(-\frac{\pi}{d} \left(\frac{a}{2} + x \right) \right) \right] - \\ - \ln \left[1 + \exp \left(-\frac{\pi}{d} \left(\frac{a}{2} - x \right) \right) \right] \end{array} \right\}}{\left\{ \begin{array}{l} \frac{3\pi a}{d} + \ln \left[1 + \exp \left(-\frac{\pi}{d} \left(\frac{a}{2} + x \right) \right) \right] + \\ + \ln \left[1 + \exp \left(-\frac{\pi}{d} \left(\frac{a}{2} - x \right) \right) \right] \end{array} \right\}}. \quad (17)$$

Тоді величина похибки від нелінійності каналу лінійних переміщень $\delta_{1.2}$ буде дорівнювати

$$\delta_{1.2} = \frac{p_{1.0} - p_{1.2}}{p_{1.0}} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Розрахунок згідно з (17) та (18) за допомогою комп'ютера показує, що в діапазоні переміщень до 1мм ($a = 4$ мм; $d = 0,5$ мм) похибка $\delta_{1.2}$ становить менше 0,5 %.

За малих переміщеннях ($x \ll a/2$) для розрахунку похибки $\delta_{1.2}$ можна застосовувати спрощені формули для визначення $p_{1.2}$ і $\delta_{1.2}$

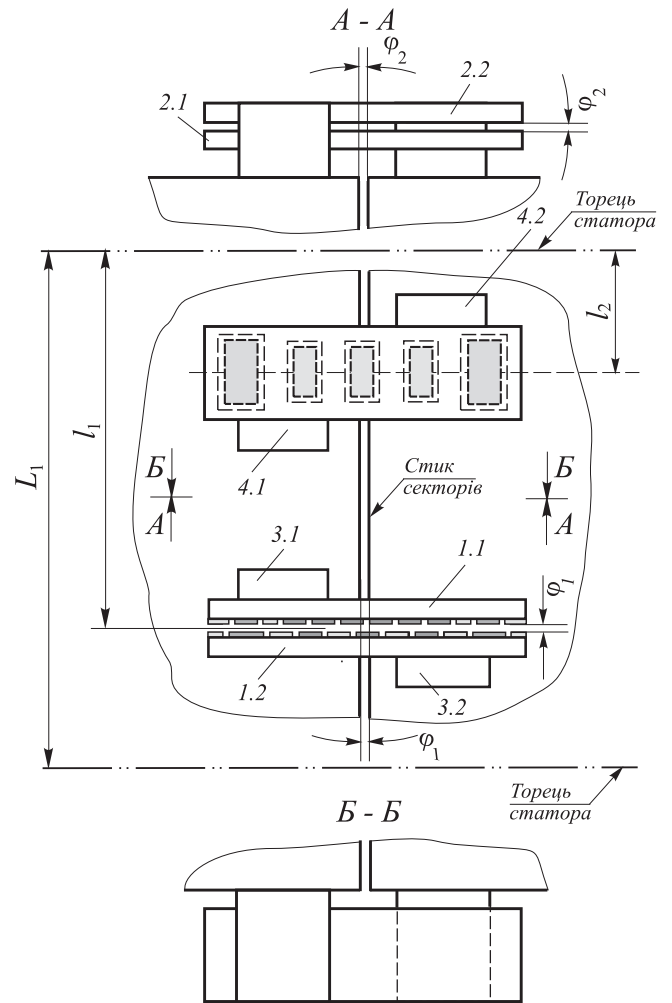


Рис. 3. Схема розміщення на статорі двокоординатних пристроїв для контролю стану стиків сектора складеного статора:
1.1, 1.2, 2.1, 2.2 – пластини з ємнісними сенсорами;
3.1, 3.2, 4.1, 4.2 – монтажні стояки.

$$p_{1.2} = (2x/a) \left[1 - \frac{2d}{3\pi a} \ln \left(1 + \exp \left(-\frac{\pi a}{d 2} \right) \right) \right]^{-1}. \quad (19)$$

$$\delta_{1.2} = \left\{ 1 - \left[1 - \frac{2d}{3\pi a} \ln \left(1 + \exp \left(-\frac{\pi a}{d 2} \right) \right) \right]^{-1} \right\} \cdot 100\%. \quad (20)$$

При розрахунку впливу зсуву осі обертання пластин сенсора на точність вимірювання кутових переміщень використані формули, отримані раніше. З виразу (6), використовуючи формули (8)–(11), отримаємо величину зміненого значення параметру $p_{1.2}$

$$p_{2.1} = \frac{\frac{b}{d} \varphi \left[1 - \frac{q\varphi}{3d} \right]}{\left[1 - \frac{q\varphi}{d} + \frac{\varphi^2}{6d^2} \left(q^2 + b^2 + \frac{t_1^2}{4} \right) \right]}. \quad (21)$$

де t_1 – ширина електродів 6.1, 6.2 каналу вимірювання кутових переміщень уздовж осі X, q – відстань від умовної осі обертання O до середини середнього електрода 3.2.



Величина похибки $\delta_{1,2}$, яка виникає при зсуві осі обертання буде дорівнювати

$$\delta_{2,1} = \frac{P_{2,0} - P_{2,1}}{P_{2,0}} \cdot 100\% = \left\{ 1 - \left[1 - \frac{q\varphi}{3d} \right] / \left[1 - \frac{q\varphi}{d} + \frac{\varphi^2}{6d^2} \left(q^2 + b^2 + \frac{t_1^2}{4} \right) \right] \right\} \cdot 100\% \quad (22)$$

Аналіз формули (22) показує, що при зростанні похибка також зростає, а при $q = b$ її значення досягає 2,7%. Таким чином, зсув осі обертання може призводити до значних мультиплікативних похибок вимірювання кутових переміщень. Ця похибка може бути також скомпенсована апаратно-програмними методами, але для цього необхідно попередньо провести експериментальне дослідження характеристик вимірювача.

Розрахунок значення середньої величини зазору в стику. На Рис. 3 показана схема розміщення на статорі двох описаних вище двокоординатних пристроїв для контролю стану стику секторів. Використовуючи інформацію, отриману з цих пристроїв, можна розрахувати середній зазор у стику.

Перший пристрій № 1, що містить ємнісний сенсор для вимірювання тангенціального зсуву секторів у напрямку x_1 і ємнісний сенсор для вимірювання кутового зсуву (перекосу) секторів φ_1 по висоті статора, створений пластинами 1.1 і 1.2. Сенсори в пристрої розташовані на сторонах пластин 1.1 і 1.2, повернених одна до одної. Пластина 1.1 монтажного стояка 3.1 з'єднується з одним із секторів стику, а пластина 2.1 з іншим сектором стояка 3.2.

Аналогічний пристрою № 1 (по конструкції) пристрій № 2 створений пластинами 2.1, 2.1 і монтажними стояками 4.1, 4.2), вимірює лінійне переміщення (зсув) x_2 в тангенціальному напрямку і відносний кутовий зсув секторів φ_2 по ширині статора (у радіальному напрямку).

Пристрій № 1 розміщений на відстані l_1 від торця статора, а пристрій №2 – на відстані l_2 .

Використовуючи виміряні пристроєм № 1 значення x_1 і φ_1 , можна розрахувати середню величину зазору x'_1 по висоті статора

$$x'_1 = x_1 - tg\varphi_1 l_1 + \frac{L_1}{2} tg\varphi_1, \quad (23)$$

де x_1 – лінійний зсув секторів у тангенціальному напрямку, φ_1 – кутовий зсув секторів по висоті, L_1 – висота секторів, l_1 – відстань від торця сектора до центра пристрою.

Середній зазор по ширині статора буде дорівнювати

$$x'_2 = x_2 - \frac{L_2}{2} tg\varphi_2, \quad (24)$$

де x_2 – лінійний зсув секторів у тангенціальному напрямку, який виміряний пристроєм № 2, φ_2 – кутовий зсув секторів по ширині статора, L_2 – ширина секторів у радіальному напрямку на Рис. 3 не показана).

Застосування запропонованого пристрою дозволить покращити якість контролю стану стиків складеного статора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кислицкий Б.В., Соколов А.Е. Контроль стыков активной стали статора гидрогенератора // Электрические станции. – 1976. – № 1. – С. 37 – 39.
2. Соколов А.Е. Тензометрическая диагностика состояния стыков статора гидрогенератора // Электрические станции. – 1977. – № 2. – С.48 – 50.
3. Левицкий А.С., Архипова Л.В. Ємнісний датчик для контролю стиків активної сталі статора гідроенергетиків // Гідроенергетика України. – 2008. – № 4. – С. 8 – 11.
4. А.с. 1783285 СССР, МПК G01B 7/00. Ёмкостный преобразователь перемещений/Левицкий А.С., Трушко А.А., Лабузов А.Е. и др. – № 4841734/28; заявл. 25.05.90.; опубл. 23.12.92, Бюл. № 47.
5. Лабузов А.Е., Левицкий А.С., Лежоев Р.С. Структура и характеристики двухкоординатного емкостного датчика микроперемещений // Техническая электродинамика. – 1992. – № 6. – С.92 – 99.
6. Левицкий А.С., Лежоев Р.С., Новик А.И. Дифференциально-емкостные измерительные преобразователи перемещения с линейной функцией преобразования // Техническая электродинамика. – 1983. – № 6. – С. 94 – 99.
7. Гринвич Ф.Б., Новик А.И., Левицкий А.С. и др. Влияние перекоса электродов емкостного дифференциального датчика на точность измерения перемещений // Техн. электродинамика. – 1985. – № 3. – С. 76–79.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М. : Наука. Главная редакция физико–математической литературы, 1981. – 719 с.

