

Разработана методика расчета вибраций системы крепления сердечника статора турбогенератора при внезапном обрыве стяжной призмы и исследовано влияние повреждения стяжных призм статора турбогенератора на изменение состояния других стяжных призм и нажимной плиты. Библиография 11, рис. 6, таблица.

Ключевые слова: стяжная призма, статор, турбогенератор, частота колебаний, механические силы, виброперемещение, виброскорость, виброускорение.

O.I. Tytko, V.A. Mystetckiy, V.A. Kramarskiy

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Mathematical modelling of vibration processes in system fastening turbogenerator stator core at the sudden breakages coupling prisms

Calculation method was developed vibrations of turbogenerator stator core mounting system at the sudden breakage of a coupling prism and the influence of damage of clamping prisms turbogenerator stator to changes of states other prisms and push plates. References 11, figures 6, table.

Key words: coupling prism stator turbogenerator, vibration frequency, vibration displacement, vibration velocity, vibration acceleration.

Надійшла 10.05.2016

Received 10.05.2016

УДК 621.586.772

ПОХИБКИ ЄМНІСНОГО ВИМІРЮВАЧА ЗАЗОРУ В ГІДРОГЕНЕРАТОРІ

А.С. Левицький, докт. техн. наук, **Є.О. Зайцев**, канд. техн. наук, **Б.А. Кромпляс**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03380, Україна
e-mail: zaitsev@ied.org.ua

Проаналізовано вплив деяких технологічних похибок ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі на точність вимірювання. Створено розрахункову схему та отримано аналітичні залежності для визначення похибки від перекосу при встановленні на розточенні осердя статора ємнісного сенсора з компланарними паралельними електродами. Розраховано адитивну похибку вимірювання зазору, зумовлену кривизною поверхні розточення осердя статора. Розроблено рекомендації зі зменшення впливу похибки від перекосу на точність вимірювання. Библиография 7, рис. 8.

Ключові слова: гідрогенератор, повітряний зазор, вимірювання, ємнісний сенсор, похибка.

У гідрогенераторах за умови невеликого повітряного зазору в порівнянні з діаметром розточення статора особливо складно досягти стабільної величини та рівномірності зазору при експлуатації. Під час роботи машини відхилення зазору від номінальних величин виникає внаслідок спотворення форми ротора та осердя статора. Відповідно до інструкції з експлуатації та ремонту гідрогенераторів асиметрія повітряного зазору визначається відхиленням значень зазорів у діаметрально протилежних точках як напівсума значень цих зазорів [1]. Все це викликає актуальну необхідність автоматичного вимірювання зазору як в процесі експлуатації, так і під час оглядів та ремонтів.

Найпоширенішим методом вимірювання зазору в потужних гідрогенераторах на цей час є ємнісний [3–7]. За використання такого методу ємнісні сенсори встановлюються на розточенні осердя статора. При цьому електрична ємність сенсорів залежить від величини повітряного зазору, тобто від відстані між обвідною полюсів ротора та поверхнею розточення осердя статора. На рис. 1 показана схема встановлення сенсорів на гідрогенераторі, де позначено: 1 – ємнісний сенсор; 2 – зубець осердя статора; 3 – полюс ротора.

У роботі [2] для вимірювання зазору запропоновано ємнісний сенсор з двома робочими компланарними паралельними електродами. Схема сенсора показана на рис. 2. До складу

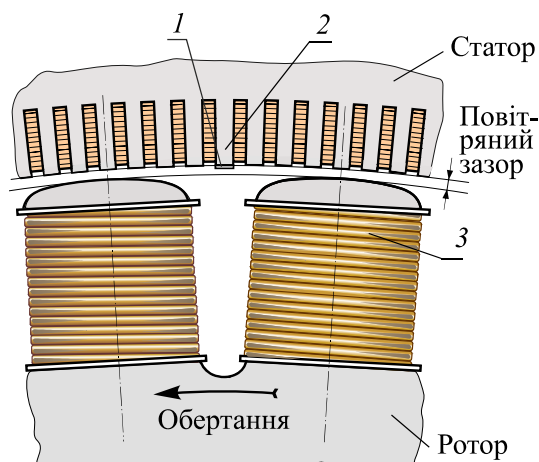


Рис. 1

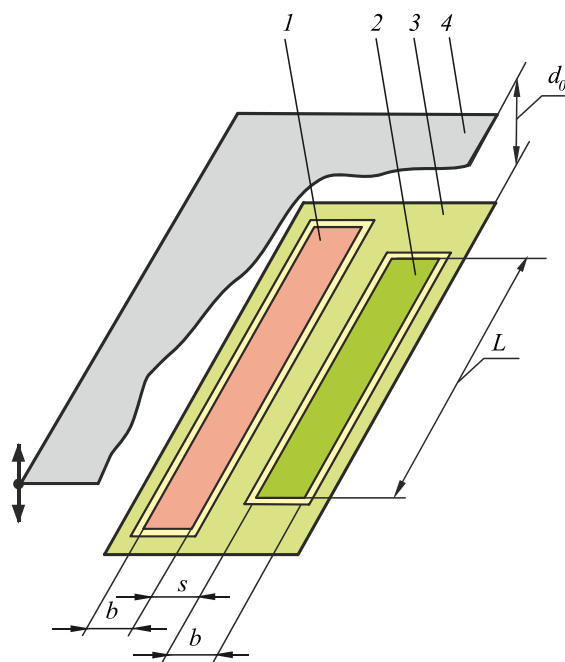


Рис. 2

сенсора входять робочі електроди сенсора 1 і 2, а також охоронний заземлений електрод 3. Всі електроди, що розміщені в одній площині, через діелектричну підкладку встановлюються на розточенні осердя статора. Площина 4 схематично відображує заземлений полюс ротора. При переміщенні площини 4 змінюється зазор d (відстань) між нею та загальною площиною електродів $d = d_0 \pm \Delta d$. Зі зміною зазору d змінюється електрична ємність між електродами 1 і 2, тобто $C_{12} = f(d)$.

При вимірюванні зазору зазначеним сенсором мають місце похибки, які зумовлені перекосом площини електродів сенсора по відношенню до твірної циліндричної поверхні розточення осердя статора та кривизни поверхні розточення.

Метою роботи є оцінка зазначених похибок та розробка рекомендацій зі зменшення їхнього впливу на результат вимірювання.

Похибка від перекосу площини електродів сенсора відносно твірної циліндричної поверхні розточення осердя статора. Якщо встановити сенсор з зазначеним перекосом (наприклад, не забезпечити рівномірність клейового проміжку між сенсором та розточенням осердя), то в результаті не буде забезпечена паралельність площини електродів по відношенню до твірної полюса ротора, і між ними виникне кут α .

На рис. 3 наведена схема для розрахунку впливу перекосу на функцію перетворення сенсора. Для розрахунку введена система координат XYZ , причому вісь OX спрямована уздовж короткої сторони b низькопотенціального електрода 2 сенсора, а вісь OY – уздовж поздовжньої осі симетрії електродів 1 і 2. Виберемо елементарну смужку 5 шириною Δy_i у площині електродів 1 і 2 на відстані y_i від початку координат. Координата смужки 5 по осі Y – точка A_0 . Якщо в точці A_0 встановити перпендикуляр z_i до площини XOY , то він перетне початкове положення (до перекосу) площини 4 у точці A_1 , а після перекосу – в точці A_2 . Елементарна ємність ΔC_{12i} між частинами смужки 5 на електроді 1 та електроді 2 складе [2]

$$\Delta C_{12i} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\pi} \Delta y_i \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4z_i} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4z_i} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4z_i} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4z_i}}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; $\varepsilon_r = 1,00056$ – відносна діелектрична проникність повітря; b – ширина електродів 1 і 2; s – відстань між електродами 1 і 2.

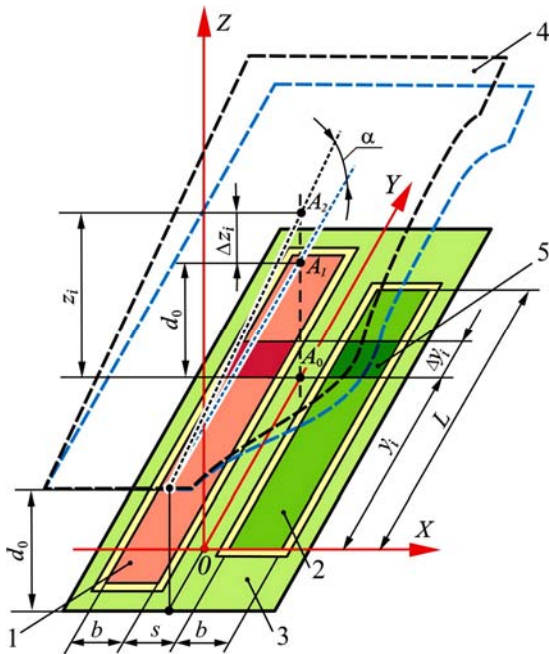


Рис. 3

2; z_i – відстань між площиною смужки 5 та площиною 4 після появи перекоосу; Δy_i – ширина елементарної смужки 5; z_i – відстань між точкою A_0 та площиною 4.

Враховуючи, що $A_0A_1 = d_0$, $A_1A_2 = \Delta z_i$ і

$$\frac{\Delta z_i}{y_i} = \operatorname{tg} \alpha, \text{ отримаємо}$$

$$z_i = d_0 + \Delta z_i = d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

де y_i – відстань між елементарною смужкою 5 та початком координат O ; d_0 – відстань між площиною електродів та площиною 4 до появи перекоосу; α – кут між площиною електродів та площиною 4, який виник внаслідок перекоосу.

Тоді

$$\Delta C_{12i} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\pi} \Delta y_i \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)}}. \quad (3)$$

Загальна ємність $C_{12\Pi}$ сенсора після перекоосу, тобто ємність між електродами 1 і 2, буде сумою нескінченної кількості ємностей елементарних площадок:

$$C_{2\Pi\Pi} = \sum_{i=1}^{i=\infty} C_{12i} = \sum_{i=1}^{i=\infty} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\pi} \Delta y_i \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)}}. \quad (4)$$

Замінивши суму ємностей інтегралом, отримаємо

$$C_{2\Pi\Pi} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\pi} \int_0^L \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)}} dy. \quad (5)$$

Як відомо з [2], ємність C_{12} між електродами 1 і 2 за відсутності перекоосу визначається формулою

$$C_{12} = L \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (6)$$

Визначимо ємності $C_{12\Pi}$ і C_{12} сенсора зазору [2], ($b=12$ мм, $s=2$ мм, $L=180$ мм), призначеного для використання на капсульному гідрогенераторі СГК 538/160-70М, використовуючи формули (5) і (6). Графіки на рис. 4 показують: 1 – зміна ємності $C_{12\Pi} = f(d)$ у но-

мінальному діапазоні вимірювання від 2 до 10 мм при перекосі; 2 – змінна ємності $C_{12} = f(d)$ без перекосу; 3 – різниця ємностей $\Delta C = C_{12} - C_{12\Pi}$.

Відносна різниця δ_{Π} між ємностями C_{12} і $C_{12\Pi}$, яка є похибкою, внесеною перекосом, буде дорівнювати

$C_{\Pi\Phi}$

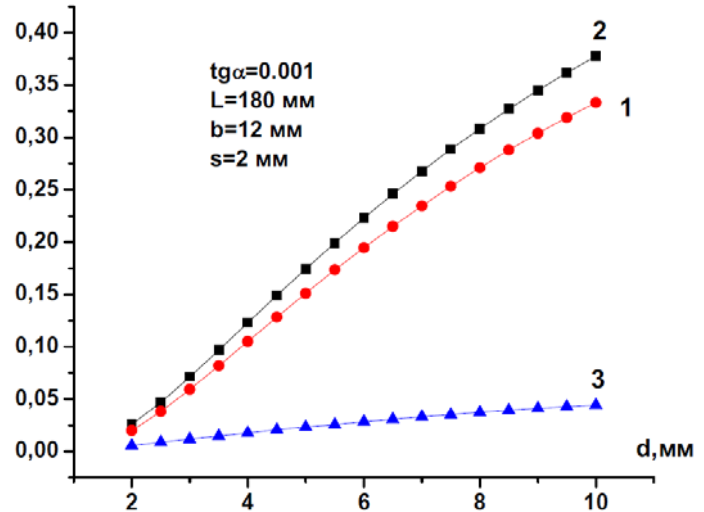


Рис. 4

$$\delta_{\Pi} = \frac{C_{120} - C_{12\Pi}}{C_{120}} \cdot 100\% =$$

$$\frac{L \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_0} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_0}}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_0} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_0}} \right)^2}{L \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)}}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)}} \right)^2 dy} \cdot 100\% =$$

$$= \left(\frac{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \int_0^L \ln \left(\frac{\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)}}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)}} \right)^2 dy}{L \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_0} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_0}}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_0} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_0}} \right)^2} \right) \cdot 100\%. \quad (7)$$

Використовуючи формулу (7), визначимо кількісну величину похибки δ_{Π} від перекосу та відобразимо її графічно. Рис. 5 ілюструє залежність похибки від кута перекосу $\delta_{\Pi} = f(\operatorname{tg} \alpha)$ для номінального зазору ($d_0 = 6$ мм) у гідрогенераторі СГК 538/160-70М, а рис. 6 – залежність похибки від величини зазору $\delta_{\Pi} = f(d)$ в цьому ж гідрогенераторі в діапазоні вимірювання від 2 до 10 мм (при перекосі $\alpha \cong \operatorname{tg} \alpha = 0,001$).

Як видно з рис. 5 та 6, через значний розмір сенсора по довжині похибка, зумовлена перекосом у цьому напрямку, є досить значною. При встановленні сенсора на розточенні осердя необхідно вживати заходи з її зменшення. Передусім, для кожного сенсора після встановлення необхідно провести вимірювання значення реального перекосу за допомогою

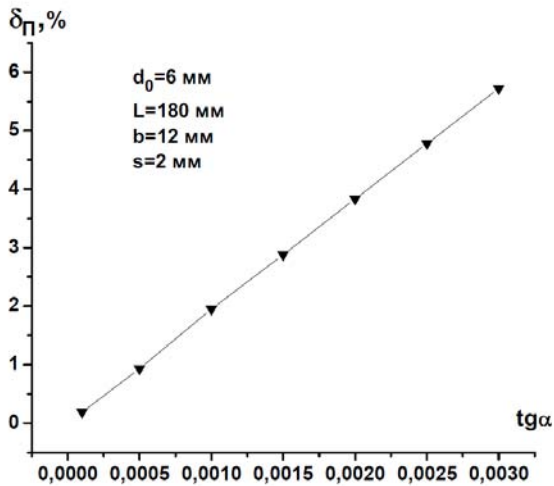


Рис. 5

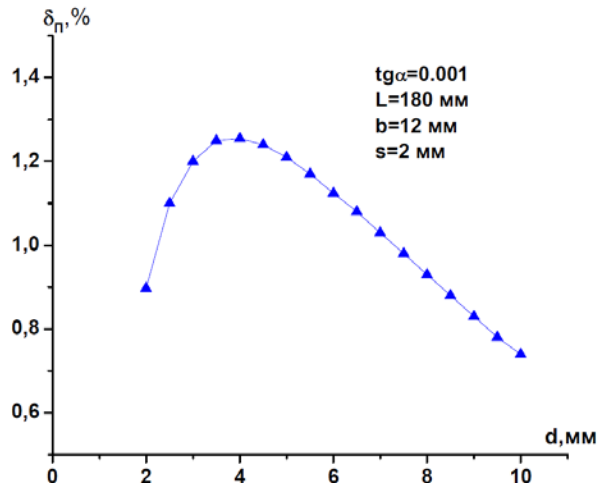


Рис. 6

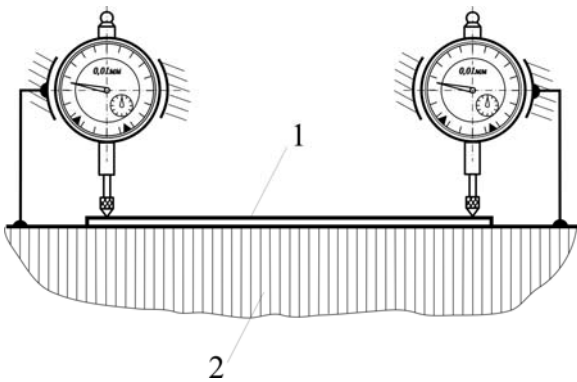


Рис. 7

годинникових індикаторів, як показано на рис. 7. Для цього необхідно виміряти відстані між площиною активного електрода сенсора 1 і поверхнею зубця 2 осердя, який є частиною розточення осердя.

Середньоарифметичне значення виміряних величин дасть константу сенсора, яка враховується при настроюванні приладу, а різниця – величину перекосу c в долях міліметра. Знаючи c , можна розрахувати коригувальне виправлення, обумовлене перекосом, і вносити його величину в результат вимірювання (враховуючи, що $c/L = \text{tg} \alpha \cong \alpha$, де L – довжина сенсора.

Похибка, зумовлена кривизною поверхні розточення осердя статора (рис. 8). При вимірюванні зазору між розточенням осердя статора 1 (точка O_p – центр розточення) та полюсом ротора 2 за допомогою сенсора 3 має місце похибка δ_d . Ця похибка є добавкою до виміряного сенсором зазору $d_p = d_c + d_{\pi}$ (де d_c – відстань від поверхні електродів сенсора до полюса ротора, d_{π} – константа). Враховуючи співвідношення в прямокутних трикутниках ABC та BO_pC , а також розміри сенсора, визначимо, що похибка δ_d буде дорівнювати

$$\delta_d = R_p \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{l}{2R_p} \right) \right], \quad (8)$$

де R_p – радіус розточення осердя статора; l – ширина сенсора.

Якщо сенсор шириною $l = 30$ мм встановити на розточенні осердя статора гідрогенератора СГК 538/160-70М, то похибка від кривизни розточення осердя становитиме $\delta_d = 0,041822$ мм.

Висновки. 1. Похибка від перекосу площини сенсора відносно твірної розточення осердя статора серед технологічних похибок є найбільш значною. При встановленні сенсора

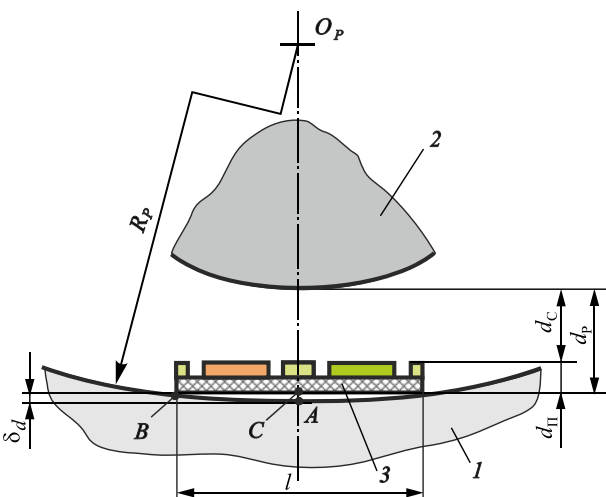


Рис. 8

на розточенні осердя необхідно зазначений перекис зводити до мінімуму.

2. Після встановлення сенсора необхідно вимірювати величину перекосу і отримане значення застосовувати для коригування впливу перекосу на результат вимірювання.

3. Похибка, зумовлена кривизною розточення осердя статора, залежить від ширини сенсора та радіуса розточення осердя статора і має постійне значення.

1. *Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007.* – Офіц. вид. – К.: ОЕП. ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2007. – 262 с.
2. *Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А.* Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2016. – Вип. 43. – С. 134–136.
3. *Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П.* Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.
4. *Air Gap Monitoring System.* Режим доступу: <http://www.mc-monitoring.com/sensors/airgap-sensors.html>
5. *Griščenko Marina.* Air gap monitoring unit generator to advance vibration diagnostic procedure: Summary of the Doctoral Thesis : Summary of the Doctoral Thesis. R.: RTU, 2015. – 20 p.
6. *VMTM Air Gap.* Capacitive Measuring Chains. Режим доступу: <http://vibrosystem.com/wp-content/uploads/9628-25D1A-103.pdf>
7. *Volkovas Vitalijus, Mikalauskas Robertas, Eidukeviciute Marija.* Air gap measuring system for purpose of diagnostics and condition monitoring. Режим доступу: <http://www.bg.utp.edu.pl/artdiagnostyka2004/volkovas.pdf>

УДК 621.586.772

А.С. Левицький, докт. техн. наук, Е.А. Зайцев, канд. техн. наук, Б.А. Кромпляс, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03380, Україна

Погрешности емкостного измерителя зазора в гидрогенераторе

Проанализировано влияние некоторых технологических погрешностей емкостного сенсора воздушного зазора в гидрогенераторе на точность измерения. Создана расчетная схема и получены аналитические зависимости для определения погрешности от перекоса емкостного сенсора с компланарными параллельными электродами, который устанавливается на расточке сердечника статора. Рассчитана адитивная погрешность измерения зазора, обусловленная кривизной расточки сердечника статора. Разработаны рекомендации по уменьшению влияния погрешности от перекоса на точность измерения. Библ. 7, рис. 8.

Ключевые слова: гидрогенератор, воздушный зазор, измерение, емкостный сенсор, погрешность.

A.S. Levytskyi, E.A. Zaitsev, B.A. Kromplyas

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

The errors of the capacitive measurer gap in the hydrogenator

The effect of some technological errors of the capacitive sensor of air gap in the hydrogenerator on the measurement accuracy is analysed. Design scheme is created and analytical dependences for calculating the inclination error of capacitive sensor with coplanar parallel electrodes, which is installed on the bore of the stator core, are obtained. Additive error measurement of the gap caused by the curvature of the bore of the stator core is calculated. Recommendations to reduce the effect of inclination error on measurement accuracy are developed. References 7, figures 8.

Key words: hydrogenerator, air gap, measurement, capacitive sensor, error.

Надійшла 29.06.2016

Received 29.06.2016