

ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

УДК: 621.317.39

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.119>

РОЗРАХУНОК ПОХИБКИ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ В ГІДРОГЕНЕРАТОРАХ З СИСТЕМОЮ КОМПЛАНАРНИХ ЕЛЕКТРОДІВ, ЗУМОВЛЕНОЇ ПЕРЕКОСОМ

А.С. Левицький^{1*}, докт. техн. наук, Є.О. Зайцев^{1**}, докт. техн. наук, В. Л. Рассовський^{2***}, С.А. Закусило^{1****}

1 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: levitskiyanatoliymail@gmail.com, zaitsev@i.ua, sergy_zakusilo@i.ua

2 – ПрАТ "Укргідроенерго",
м. Вишгород, Київська обл., 07300, Україна
v.rassovskyi@uhe.gov.ua

У статті розглянуто технологічні похибки, що виникають у разі використання ємнісних сенсорів для вимірювання повітряного проміжку (ПП) в гідрогенераторах, зокрема ті, що зумовлені неточністю їхнього встановлення на машині. Основну увагу приділено аналізу похибки, викликаній перекосом площини електродів сенсора відносно твірної розточення осердя статора. Виявлено, що перекіс електродів може суттєво впливати на точність вимірювань, що зі свого боку впливає на ефективність та надійність роботи гідрогенератора.

Проведено детальну оцінку впливу цього перекосу на результати вимірювання за допомогою сенсора, який складається із системи з N компланарних паралельних стрічкових електродів, розташованих перпендикулярно до твірної розточення осердя. Розроблено розрахункову схему для кількісної оцінки похибки, що дає змогу визначити величину похибки з урахуванням аналітичних залежностей. Використано числові методи для оцінки впливу перекосу на точність вимірювань. Результати були отримані для сенсора, призначеного для капсульного гідрогенератора типу СГК538/160-70М. На основі отриманих результатів розроблено практичні рекомендації щодо зменшення впливу похибки від перекосу на точність вимірювання. Бібл. 11, рис. 6.

Ключові слова: гідрогенератор, повітряний проміжок між статором і ротором, вимірювання, ємнісний сенсор, перекіс площини сенсора, похибка.

Вступ і постановка завдання. У потужних гідрогенераторах (ГГ) величина повітряного проміжку (ПП) між обвідною полюсів ротора та розточенням осердя статора є критично важливою для забезпечення стабільної роботи машини. Навіть незначні відхилення ПП від установлених норм можуть суттєво вплинути на характеристики машини. Тому міжнародні та державні нормативні документи [1, 2] вимагають, щоб ПП у ГГ у діаметрально протилежних точках розточення осердя статора ГГ відрізнялися один від одного не більше ніж на $\pm 20\%$ у разі, якщо заводськими інструкціями не передбачені більш жорсткі норми. Суворе дотримання вимог під час виготовлення, монтажу та експлуатації гідрогенератора дає змогу підвищити надійність та довговічність машини. Усе це викликає актуальну необхідність автоматичного вимірювання ПП як у процесі експлуатації, так і під час оглядів та ремонтів.

На сьогодні завдання достовірного контролю ПП у світовій практиці вирішується здебільшого використанням електронних ємнісних вимірювачів із сенсорами у вигляді плоских пластин, які встановлюються на розточення осердя статора [3]. Ємнісні вимірювачі ПП мають відносно високі метрологічні характеристики, їхні сенсори нечутливі до впливу потужних магнітних полів, а діапазон робочих температур залежать тільки від характеристик матеріа-



лів, із яких вони виготовлені. Ємнісні сенсори легко піддаються розрахунку та відтворенню, зокрема в разі масового та серійного виробництва, нескладні у виготовленні та налагодженні. Достатня інформативність контролю ПП із використанням системи ємнісних сенсорів, особливо для машин з великими діаметрами розточення осердя статора (насамперед для контролю відхилення форми розточення) досягається завдяки встановленню необхідної кількості сенсорів. Найвідоміші світові компанії, які серійно випускають ємнісні вимірювачі ПП для ГГ: VibroSystem (Канада) [4, 5], Bently Nevada (США) [6], Iris Power (Канада, США) [7], Meggitt SA (Швейцарія) [8].

Ємнісні сенсори ПП за своєю конструкцією є довгими тонкими плоскими пластинами, які встановлюються на внутрішню поверхню осердя статора. Під час встановлення ємнісного сенсора ПП на осерді потрібно стежити за тим, щоб площа сенсора, звернена до полюсів ротора, була паралельною твірній розточення осердя статора, запобігаючи в такий спосіб перекосу.

Аналіз наявних науково-технічних джерел показав, що вищезазначені зарубіжні компанії обмежуються публікацією технічних характеристик сенсорів, без публікації даних щодо оцінки впливу похибок на результати вимірювань повітряного проміжку. Для сенсорів ПП у ГГ, створених в Інституті електродинаміки НАН України [3, 9, 10], проводилась оцінка впливу похибки, зумовленої перекосом площини електродів сенсора відносно твірної розточення осердя статора на результат вимірювання для сенсорів зі стрічковими компланарними електродами. Було встановлено, що похибка від перекосу є значною, і під час встановлення сенсорів на осерді статора для її зменшення необхідно дотримуватись спеціальних вимог. Тому актуальним є завдання мінімізації впливу похибки через перекоп на результати вимірювання ПП у ГГ. Це можна реалізувати шляхом вдосконалення конструкції ємнісного сенсора, а саме застосувавши замість стрічкових електродів систему компланарних електродів.

Метою роботи є розрахунок похибки ємнісного сенсора повітряного проміжку в гідрогенераторах із системою компланарних електродів, зумовленої перекосом площини електродів сенсора відносно твірної розточення осердя статора.

Основна частина. У роботі [11] запропоновано конструкцію ємнісного сенсора ПП у потужних ГГ, який є розвитком теорії і практики побудови ємнісних вимірювачів ПП, створених в ІЕД НАН України. Він має високу точність вимірювання завдяки усуненню впливу крайових ефектів, а також кривизни полюсів ротора. Схему вимірювання ПП зазначеним сенсором показано на рис. 1, де: 1 – ємнісний сенсор із системою електродів, 2 – розточення осердя статора ГГ, 3 – полюс ротора. Зі зміною відстані d_{VAR} між загальною площиною електродів сенсора і заземленою поверхнею полюса ротора змінюється електрична ємність C_{VAR} між електродами сенсора.

До складу сенсора (рис. 2) входять стрічкові, паралельні між собою і перпендикулярні твірній розточення осердя статора високопотенціальні електроди 1, низькопотенціальні електроди 2 та додатковий заземлений електрод 3.

Додатковий електрод 3 розташований навколо високопотенціальних і низькопотенціальних електродів та між ними. Електроди 1, 2 і 3 розміщені в одній площині й відокремлені один від одного діелектричними проміжками 4. Усі електроди утворені тонким металевим шаром (наприклад, міді), нанесеним на плоску діелектричну пластину. Інформативною ємністю про величину ПП є ємність C_{12} між системою електродів 1 і 2, яка змінюється зі зміною відстані між загальною площиною електродів 1, 2 і 3 та поверхнею полюса ротора (рис. 1). Як показано в [11], ця ємність визначається формулою

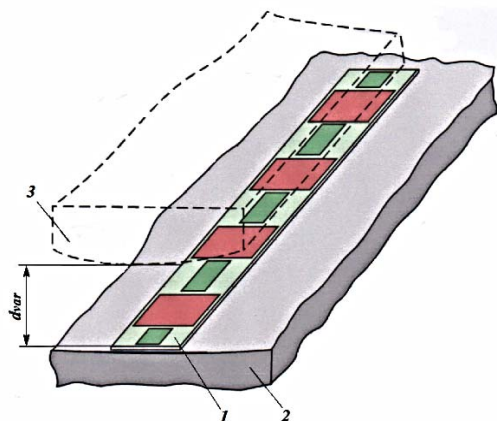


Рис. 1. Схема вимірювання ПП в ГГ

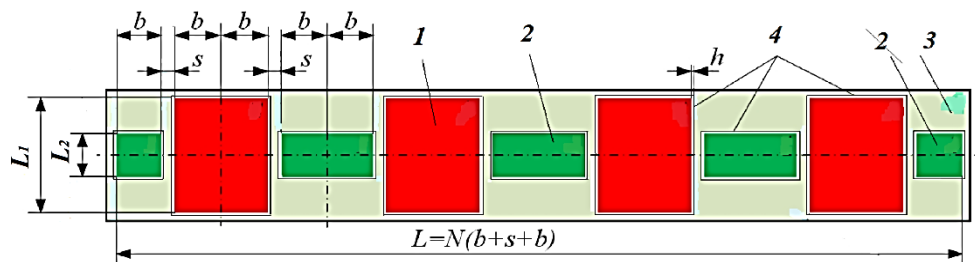


Рис. 2. Загальний вид ємнісного сенсора ПП в ГГ

$$C_{12} = N \cdot L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; ε_r – відносна діелектрична проникність повітря, b – ширина високопотенціального та низькопотенціального електродів, s – відстань між електродами 1 і 2, L_2 – довжина низькопотенціального електрода 1, d – відстань між загальною площиною електродів 1, 2, 3 і полюсом ротора 7, N – кількість елементарних сенсорів, утворених електродами 1 і 2 у разі паралельного з'єднання.

Для визначення похибки, зумовленої перекосом загальної площини електродів сенсора відносно твірної розточення осердя статора, складемо розрахункову схему (рис. 3). Приймемо деякі допущення, які спростують розрахунок, але не впливають на результат визначення похибки: а) поверхня полюса ротора є плоскою; б) оскільки перекіс двох площин є параметром відносним, то перекошеною нехай буде поверхня полюса ротора.

У початковому положенні (без перекосу) поверхня полюса є паралельною площині електродів сенсора і знаходиться від неї на відстані d . Із виникненням перекосу поверхня полюса ротора повернеться відносно своєї сторони М на кут α .

Введемо систему координат XOY , помістимо центр O в середню точку 1-го низькопотенціального електрода 2, вісь X спрямуємо вдовж сторони L_2 , а вісь Y – вдовж середньої лінії системи електродів сенсора. Виберемо i -й елементарний сенсор, утворений $1i$ -тим елементарним високопотенціальним електродом і $2i$ -тим низькопотенціальним електродом (на рис. 3 – область, обмежена точками A, C, D, B). Точка O_1 – геометричний центр i -го елементарного сенсора. Координата лінії розподілу $1i$ -го і $2i$ -го сенсорів за віссю

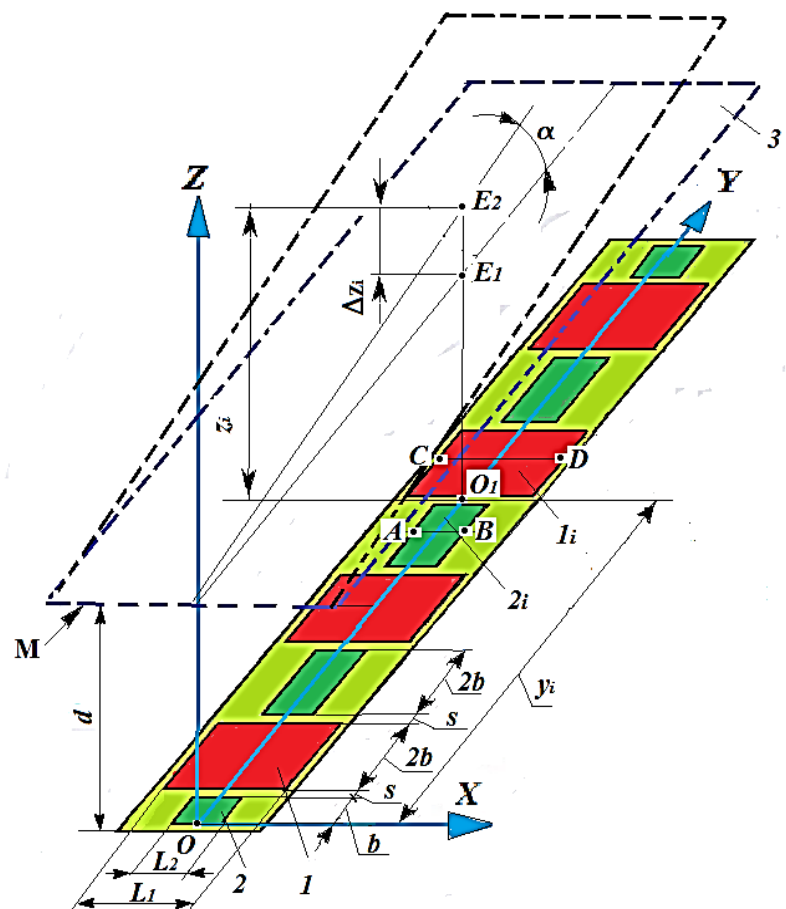


Рис. 3. Розрахункова схема аналітичного визначення впливу перекосу

$OY - y_i$. За відсутності перекосу ємність C_{1i2i} i -го елементарного сенсора складе

$$C_{1i2i} = L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (2)$$

Водночас загальна ємність системи із N елементарних сенсорів складе

$$C_{12} = NL_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (3)$$

Із виникненням перекосу ємність i -го елементарного сенсора зміниться й дорівнюватиме

$$C_{1i2i\Pi} = L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4z_i} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4z_i} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4z_i} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4z_i}}, \quad (4)$$

де $z_i = d + y_i \operatorname{tg} \alpha$ – відстань від центру елементарного i -го сенсора до перекошеної площини 3 полюса ротора.

Із рис. 3 видно, що для елементарного i -го сенсора $y_i = N_i(s+2b)$. Тоді $z_i = d + y_i \operatorname{tg} \alpha = d + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha$. У такому випадку формула (4) набуде вигляду

$$C_{1i2i\Pi} = L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]}}. \quad (5)$$

Із урахуванням того, що в системі є N елементарних сенсорів, загальна ємність $C_{12\Pi}$ системи із виникненням перекосу буде дорівнювати

$$C_{12\Pi} = L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \sum_1^N \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]}}. \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} \delta_{\Pi} &= \frac{C_{12\Pi} - C_{12}}{C_{12}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{\sum_1^N \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d + N_i[s+2b] \operatorname{tg} \alpha)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d + N_i[s+2b] \operatorname{tg} \alpha)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d + N_i[s+2b] \operatorname{tg} \alpha)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d + N_i[s+2b] \operatorname{tg} \alpha)}} - N \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}}{N \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}} \cdot 100\% = \end{aligned}$$

$$= \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{\operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d + N_i(s+2b)\operatorname{tg}\alpha]} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d + N_i(s+2b)\operatorname{tg}\alpha]}}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d + N_i(s+2b)\operatorname{tg}\alpha]} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d + N_i(s+2b)\operatorname{tg}\alpha]}} \right)}{N \ln \left(\frac{\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d}}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}} \right)} - 1 \right\} \cdot 100\% \quad (7)$$

Використовуючи формулу (7), визначимо кількісну величину похибки від перекосу для сенсора ПП, створеного для застосування на капсульному ГГ типу СГК538/160-70М. Розміри сенсора: $b = 12$ мм – ширина високопотенціального та низькопотенціального електродів, $s = 2$ мм – відстань між електродами 1 і 2, L_2 – довжина низькопотенціального електрода 1, $N = 8$ – кількість елементарних сенсорів, утворених електродами 1 і 2 у разі паралельного з'єднання. Розрахунок зроблено для номінального зазору $d = 6$ мм у діапазоні кута перекосу $0 \leq \alpha \leq 0,003$.

Рис. 4 ілюструє залежність $\delta_{\Pi} = f(\operatorname{tg}\alpha)$.

Як видно з рис. 4, похибка від перекосу сенсора ПП із системою електродів, перпендикулярних твірній розточення статора, запропонованого в [11], у 2 рази менша, ніж аналогічна похибка сенсора із двома паралельними електродами, паралельними твірній розточення осердя [9,10]. Але водночас є досить значною. Тому під час встановлення сенсора на розточенні осердя необхідно вживати заходів задля її зменшення. Передусім для кожного сенсора після встановлення необхідно провести вимірювання значення реального перекосу за допомогою годинникових індикаторів, як показано на рис. 5. Для цього необхідно виміряти відстані між площиною електродів сенсора 1 і поверхнею 2 розточення осердя, який є частиною розточення осердя.

Середньоарифметичне значення вимірюваних величин дасть константу сенсора, яка враховується під час юстування приладу, а різниця – величину перекосу c у долях міліметра. Знаючи середнє значення c , можна розрахувати коригувальне виправлення, обумовлене перекосом, і внести його величину в результат вимірювання, враховуючи, що $c/L = \operatorname{tg}\alpha \cong \alpha$, де L – довжина сенсора (рис. 6).

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що застосування сенсора повітряного проміжку із системою низькопотенціальних і високопотенціальних електродів, перпендикулярних твірній розто-

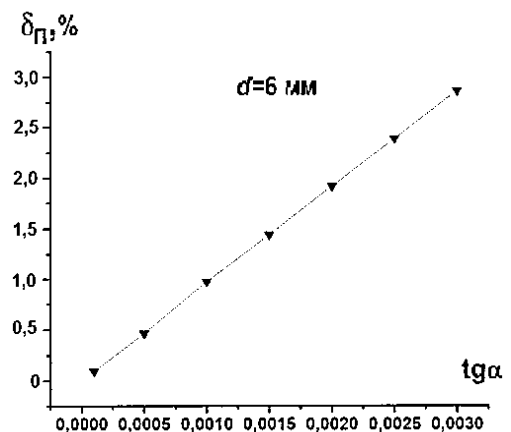


Рис. 4. Графік величини похибки ємнісного сенсора ПП, зумовленої перекосом

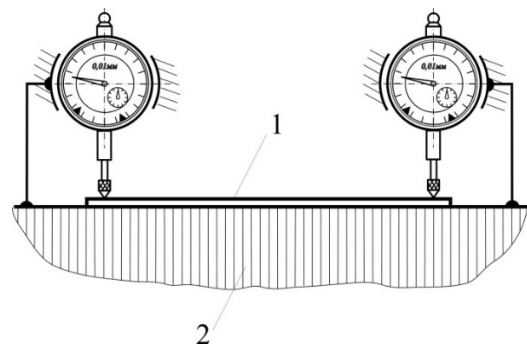


Рис. 5. Контроль величини перекосу ємнісного сенсора ПП під час встановлення на розточенні осердя статора

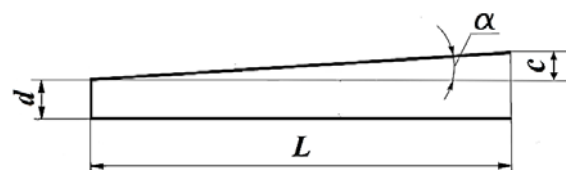


Рис. 6. Схема розрахунку коригувального виправлення похибки, зумовленої перекосом площини

чення осердя статора гідрогенератора, порівняно із сенсорами, в яких електроди паралельні твірній розточення, зменшує похибку, зумовлену перекосом площини сенсора відносно твірної розточення осердя статора в 2 рази.

Робота виконана за держбюджетною темою «Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці», шифр «ПАРАМЕТР-Д», реєстраційний номер (0122U000136) та проектом Національного фонду досліджень України «Моделі і засоби підвищення ефективності роботи гідро- та гідроакуюлюючих електростанцій для балансування ОЕС України в умовах ринку електричної енергії та особливих технологічних обмежень» з виконання наукових досліджень і розробок «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» (номер 2022.01/0069).

1. ISO 19283:2020 (E). Condition monitoring and diagnostics of machines. Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 p.
2. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Норми випробування електрообладнання. Міністерство енергетики та захисту довкілля України. Офіційне видання ПрАТ "НЕК "Укренерго". 238 с.
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 (Rotor/Stator). VM™ Air Gap. URL: https://www.vibrosystem.com/en/product/vm_air_gap. (accessed: 13.07.2024).
5. VM3 & VM5 Airflow For Capacitive Air Gap Measuring Chains. URL: <https://library.vibrosystem.com/en/Datasheets/9628-25D6A-110.pdf>. (accessed: 13.07.2024).
6. 4000 Series Air Gap Sensor System. Datasheet. Bently Nevada Machinery Condition Monitoring.. URL: <https://dam.bakerhughes.com/m/4dfdaa01abf81f67/original/4000-Series-Air-Gap-Sensor-System-Datasheet-167885-pdf.pdf>. (accessed: 13.07.2024).
7. Iris Power AGTracII. URL: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2016/11/Iris-Power-Air-Gap-Condition-Monitoring-AGTracII-Brochure.pdf>. (accessed: 13.07.2024).
8. LS121 and ILS731 air-gap measurement system. URL: https://catalogue.meggittsensing.com/wp-content/uploads/2020/12/DS_LS121_ILS731-en.pdf. (accessed: 13.07.2024).
9. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в генераторах. Патент України на винахід № 115924, 2018.
10. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. Похибки ємнісного сенсора зазору в гідрогенераторі. *Праці Інституту електродинаміки НАНУ*. 2016. Вип. 44. С. 50–55.
11. Левицький А.С., Рассовський В.Л., Зайцев Є.О. Ємнісний сенсор з системою компланарних електродів для вимірювання повітряного зазору в гідрогенераторах. *Технічна електродинаміка*. 2023. №. 3. С. 80–85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.080>

CALCULATION OF PLATE SKEW ERROR OF THE AIR GAP CAPACITIVE SENSOR IN HYDROGEN GENERATORS WITH A SYSTEM OF COPLANAR ELECTRODES

A. S. Levitskiy¹, Ie. O. Zaitsev¹, V. L. Rassovsky², S.A. Zakusilo¹

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03680, Ukraine

e-mail: levitskiyanatoliymail@gmail.com, zaitsev@i.ua, sergy_zakusilo@i.ua

2 – PJSC "Ukrhydroenergo", Vyshhorod, 07300, Ukraine

e-mail: v.rassovsky@uhe.gov.ua

In this paper calculating the technological errors that arise when using capacitive sensors to measure the air gap (AG) in hydrogen generators, in particular, those caused by the inaccuracy of their installation on the machine. The results of the analysis of the error caused by the skew of the plane of the sensor electrodes relative to the constructive boring of the stator core are given. It was found that the skew of the electrodes could significantly affect the accuracy of the measurements, which in turn affects the efficiency and reliability of the hydrogen generator. A detailed assessment of the influence of this skew on the measurement results was carried out using a sensor consisting of a system of N coplanar parallel strip electrodes located perpendicular to the core boring. A calculation scheme has been developed for the quantitative assessment of the error, which allows determining the value of the error taking into account analytical dependencies. Numerical methods were used to assess the influence of skew on the accuracy of measurements, and the results were obtained for a sensor designed for a capsule hydrogen generator of the SGK538/160-70M type. Based on the obtained results, practical recommendations have been developed to reduce the impact of skew error on measurement accuracy. Ref. 11, fig. 6.

Key words: hydrogen generator, air gap between stator and rotor, measurement, capacitive sensor, skew of the sensor plane, error.

1. ISO 19283:2020 (E). Condition monitoring and diagnostics of machines. Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 p.
2. SOU-N EE 20.302:2020. Norms of electrical equipment testing. Ministry of Energy and Environmental Protection of Ukraine. Publication of PJSC NEC Ukrenergo. 238 p. (Ukr)
3. Levitsky A.S., Fedorenko H.M., Gruboy O.P. Control of the state of powerful hydro- and turbogenerators with the help of capacitive meters of parameters of mechanical defects. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2011. 242 p. (Ukr)
4. Air Gap monitoring (Rotor/Stator). VMTM Air Gap. URL: https://www.vibrosystm.com/en/product/vm_air_gap (accessed 13.07.2024)
5. VM3 & VM5 Airflow For Capacitive Air Gap Measuring Chains. URL: <https://library.vibrosystm.com/en/Datasheets/9628-25D6A-110.pdf>
6. 4000 Series Air Gap Sensor System. Datasheet. Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. URL: <https://dam.bakerhughes.com/m/4dfdaa01abf81f67/original/4000-Series-Air-Gap-Sensor-System-Datasheet-167885-pdf.pdf> (accessed at 13.07.2024)
7. Iris Power AGTracII. [Online]. Available: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2016/11/Iris-Power-Air-Gap-Condition-Monitoring-AGTracII-Brochure.pdf> (accessed: 13.07.2024)
8. LS121 and ILS731 air-gap measurement system. [Online]. Available: https://catalogue.meggittsensing.com/wp-content/uploads/2020/12/DS_LS121_ILS731-en.pdf (accessed: 13.07.2024)
9. Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kromplyas B.A. Capacitive sensor for measuring the air gap in generators. Patent UA No. 115924, 2018. (Ukr)
10. Levitsky A.S., Zaitsev I.O., Kromplyas B.A. Errors of the capacitive gauge in the hydrogenerator. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. Vol. 44. Pp. 50–55. (Ukr)
11. Levytskyi A.S., Rassovskyi V.L., Zaitsev I.O. A capacitive sensor with a system of coplanar electrodes for measuring the air gap in hydrogen generators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No. 3. Pp. 80–85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.080> (Ukr)

Надійшла: 14.08.2024

Прийнята: 04.09.2024

Submitted: 14.08.2024

Accepted: 04.09.2024