

НАПІВДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ ЄМНІСНИЙ СЕНСОР ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ В ГІДРОГЕНЕРАТОРАХ

Отримано 08 сер. 2024 р.; рекомендовано до публікації 16 вер. 2024 р.
Доступно онлайн 01 жов. 2024 р.

Левицький А. С.¹, Зайцев Є. О.², Рассовський В. Л.³

Автор для кореспонденції: Євген Зайцев,
e-mail: zaitsev@i.ua

¹ д-р. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-0146-9498>

² д-р. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0003-3303-471X>

³ головний інженер
<https://orcid.org/0009-0002-1666-3063>

^{1, 2} Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна

³ ПрАТ «Укргідроенерго», м. Вишгород, Україна

У роботі запропоновано та досліджено напівдиференціальний ємнісний сенсор для вимірювання повітряного проміжку між розточенням осердя статора й полюсами ротора в потужному гідрогенераторі. Основними функціональними частинами сенсора є змінний робочий конденсатор та постійний робочий конденсатор, геометрія електродів якого є подібною до геометрії електродів змінного конденсатора.

Конструкція сенсора являє собою багатошарову друковану плату з провідними та діелектричними ізолювальними шарами. Змінний конденсатор і постійний конденсатор утворені системами рівних за шириною стрічкових паралельних компланарних високопотенціальних та низькопотенціальних електродів, між якими розміщуються заземлені електроди. Співвідношення між шириною високопотенціального, низькопотенціального та заземленого електродів у робочих конденсаторах вибрано залежно від величини вимірюваного номінального зазору. Довжина високопотенціальних та низькопотенціальних електродів постійного конденсатора визначається розмірами вирізу в діелектричному шарі, який визначає ємність зазначеного конденсатора. Вимірюється електрична ємність між системою паралельно з'єднаних між собою високопотенціальних електродів і системою паралельно з'єднаних між собою низькопотенціальних електродів робочого змінного конденсатора, яка функціонально залежить від величини повітряного зазору. Вимірюється електрична ємність між системою паралельно з'єднаних між собою високопотенціальних електродів і системою паралельно з'єднаних між собою низькопотенціальних електродів постійного конденсатора, яка функціонально залежить від величини повітряного проміжку, що визначається товщиною діелектричного шару з вирізом в друкованій платі. Усунення впливу зовнішнього середовища досягається за рахунок того, що у вторинному вимірювальному перетворювачі як інформативний параметр визначається відношення вказаних значень ємності. Визначено аналітичні та графічні залежності для функції перетворення сенсора, призначеного для використання на капсульному гідрогенераторі типу СГК538/16070М. Сенсор в порівнянні з аналогами має вищу точність вимірювання завдяки застосуванню напівдиференціальної схеми вимірювання, яка усуває вплив зовнішнього середовища. Сенсор або система сенсорів можуть бути використані як окремий вимірювач, так і як складова частин систем моніторингу та діагностики.

Біб. 14. Рис. 4.

Ключові слова: гідрогенератор, розточення осердя статора, полюс ротора, повітряний зазор, вимірювання, напівдиференціальний ємнісний сенсор.

HALF-DIFFERENTIAL CAPACITIVE AIR GAP SENSOR FOR HYDROGENERATORS

Received Aug. 08, 2024; accepted Sep. 16, 2024
Available online Oct. 01, 2024

Levytskyi A.¹, Zaitsev I.², Rassovskyi V.³

Author for correspondence: levgen Zaitsev,
e-mail: zaitsev@i.ua

¹ Dr. of Tech Science
<https://orcid.org/0000-0002-0146-9498>

² Dr. of Tech Science
<https://orcid.org/0000-0003-3303-471X>

³ Chief Engineer
<https://orcid.org/0009-0002-1666-3063>

^{1, 2} Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ PJSC "Ukrhydroenergo", Vyshhorod, Ukraine.

In the paper proposed half-differential capacitive sensor for measuring the air gap between the stator core boring and the rotor poles in a powerful hydro-generator. The main parts of the sensor are a variable working capacitor and a constant working capacitor, the electrode geometry of which is similar to the geometry of the electrodes of the variable capacitor. Sensor construction is a multilayer printed circuit board with conductive and dielectric insulating layers. The variable capacitor and the constant capacitor are formed by systems of strip parallel coplanar high-potential and low-potential electrodes of equal width, between which the grounded electrodes are placed. The ratio between the width of the high-potential, low-potential and grounded electrodes in the working capacitors is chosen depending on the value of the measured nominal air gap. The length of the high-potential and low-potential electrodes of the permanent capacitor is determined by the size of the gap in the dielectric layer, which determines the capacity of the specified capacitor. The electric capacity is measured between the system of parallel-connected high-potential electrodes and the system of parallel-connected low-potential electrodes of the working variable capacitor, which functionally depends on the size of the air gap. The electrical capacity between the system of parallel-connected high-potential electrodes and the system of parallel-connected low-potential electrodes of a constant capacitor is measured, which functionally depends on the size of the air gap, which is determined by the thickness of the dielectric layer with a cutout in the printed circuit board. To eliminate the influence of the external environment, the ratio of the capacities of the constant and variable capacitor used to determine the informative parameter. Analytical and graphical dependences for the conversion function of the sensor intended for use on a capsule hydrogen generator of the SGK538/160-70M type have been determined. Compared to analogues, the sensor has a higher measurement accuracy due to half-differential measurement scheme used, which eliminates the influence of the external environment. A sensor or a system of sensors can be used as a separate meter or as a component of monitoring and diagnostic systems.

Ref. 14. Fig. 4.

Keywords: hydrogen generator, stator core boring, rotor pole, air gap, measurement, semi-differential capacitive sensor.

Перелік використаних скорочень та позначень:

ПП – повітряний проміжок

ГГ – гідрогенератор

Вступ і постановка завдання. Одним із найважливіших параметрів, який значною мірою впливає на ефективність роботи потужного гідрогенератора (ГГ), є повітряний проміжок (ПП) між полюсами ротора та поверхнею розточення осердя статора. Цей параметр є критично важливим для забезпечення стабільної роботи машини, оскільки навіть незначні відхилення можуть істотно вплинути на електромагнітні характеристики та надійність гідрогенератора, його функціональність і продуктивність. У міжнародних і державних нормативних документах [1, 2] зазначено, що ПП в гідрогенераторах в діаметрально

протилежних точках розточення осердя статора мають відрізнятися один від одного не більше, ніж на $\pm 20\%$, якщо заводськими інструкціями не передбачені більш жорсткі норми. Суворе дотримання вимог під час виготовлення, монтажу й експлуатації гідрогенератора дає змогу підвищити надійність та довговічність машини.

Для забезпечення достовірного контролю ПП в ГГ на цей час найширше використовуються автоматизовані вимірювачі на базі ємнісних сенсорів (ЕС), що виконані в формі пластини, яка закріплюється на розточенні осердя

статора [3]. Ємнісні сенсори мають відносно високі метрологічні характеристики, нечутливі до впливу потужних електромагнітних полів, а діапазон їх робочих температур визначається лише характеристиками матеріалів, з яких вони виготовлені. Ємнісні сенсори легко піддаються розрахунку та відтворенню, у тому числі при масовому і серійному виробництві, нескладні у виготовленні й налагодженні. Достатня інформативність контролю ПП з використанням системи ємнісних сенсорів, особливо для контролю форми розточення статора, 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].

Аналіз науково-технічних джерел показав, що зазначені компанії не публікують даних щодо геометрії електродів ємнісних сенсорів і даних з оцінки впливу конструктивних розмірів осердя статора і полюсів ротора ГГ, а також фізичних параметрів зовнішнього середовища, зокрема вологості, на функцію їх перетворення (залежність зміни вихідної величини від зміни вхідних параметрів). В ІЕД НАН України було створено і досліджено ряд ємнісних сенсорів ПП в ГГ, в який мінімізовано вплив таких факторів, як індукція магнітного поля в ПП [9, 10] і вплив кривизни полюса ротора [11, 12]. Водночас на основі результатів досліджень впливу параметрів зовнішнього середовища на функцію перетворення ємнісних сенсорів встановлено, що він є відомим фактором, який призводить до виникнення додаткової похибки, яка здебільшого обумовлена зміною температури та вологості повітряного середовища, що оточує ємнісний сенсор ПП у гідрогенераторі. Дослідження впливу параметрів зовнішнього середовища на ємнісні сенсори ПП, запропонованих у [9–12], не проводились, а інформація для ємнісних сенсорів інших компаній відсутня. Тому виконання завдання мінімізації впливу зовнішніх параметрів на результат вимірювання значення ПП ємнісними сенсорами в гідрогенераторах [9–12] є актуальним. Для цього слід удосконалити конструкцію електродів сенсора шляхом застосування напівдиференціальної схеми вимірювання, що дозволить підвищити їхню стійкість до впливу повітряного середовища в гідрогенераторах.

Метою цієї роботи є визначення характеристик напівдиференціального ємнісного сенсора повітряного проміжку в гідрогенераторах, в якому мінімізовано похибку вимірювання, зумовлену впливом параметрів повітряного середовища в гідрогенераторі.

Основна частина. Під час вимірювання переміщень і розмірів, таких як вимірювання ПП в потужних гідрогенераторах, важливо зменшити вплив неінформативних параметрів на результати вимірювань, наприклад температурних змін геометричних розмірів електродів вимірювального конденсатора, змін температури й вологості середовища в робочих проміжках сенсорів. Для зменшення цього впливу оптимальним та ефективним є застосування диференціальної схеми вимірювання [13,

14]. У цьому разі сенсор складається з двох частин, причому ємність однієї частини зі збільшенням вимірюваного параметра збільшується, а іншої – зменшується, і навпаки. Інформативним параметром диференціального сенсора є відношення значень ємності складових частин. Така схема вимірювання ємності сенсора зменшує вплив на результати вимірювань зовнішніх факторів, як-от коливання температури або вологості, оскільки ці фактори впливають на вимірювану ємність обох частин однаково. Але для сучасного перспективного сенсора ПП, описаного в [11] диференціальну схему вимірювання застосувати неможливо. Тому пропонується створити напівдиференціальний сенсор, додавши в конструкцію сенсора поряд зі змінним робочим конденсатором постійний конденсатор з електродами, геометрично подібними змінному конденсатору.

Схему вимірювання ПП ємнісним сенсором, наведеним в [11], показано на рис. 1, а, де: 1 – ємнісний сенсор з системою електродів, 2 – розточення осердя статора ГГ, 3 – полюс ротора. Зі зміною відстані d_{VAR} між загальною площиною електродів сенсорів і поверхнею полюса ротора змінюється електрична ємність C_{VAR} між електродами сенсора. На рис. 1, б наведено розміщення такого сенсора ПП на зубці статора гідрогенератора типу СГК538/160-70М.

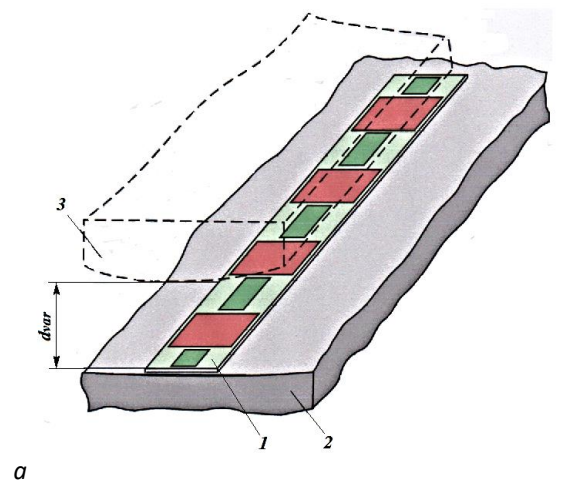


Рис. 1. Схема вимірювання ПП в ГГ ємнісним сенсором

Fig. 1. Scheme of measuring the air gap in the hydrogen generator with a capacitive sensor

До складу сенсора (рис. 2) входять стрічкові, паралельні між собою і перпендикулярні твірній розточення осердя статора високо-потенціальні електроди 1, низько-потенціальні електроди 2 та додатковий заземлений електрод 3. Додатковий електрод 3 розташований навколо високо-потенціальних і низько-потенціальних електродів та між ними. Електроди 1, 2 і 3 розміщені в одній площині й відокремлені один від одного діелектричними проміжками 4.

Інформативною ємністю про величину ПП є ємність C_{12VAR} між системою електродів 1 і 2, яка змінюється зі зміною відстані d_{VAR} між загальною площиною електродів 1, 2 і 3 та поверхнею полюса ротора 7. Як показано в [11], ця ємність визначається за формулою (1).

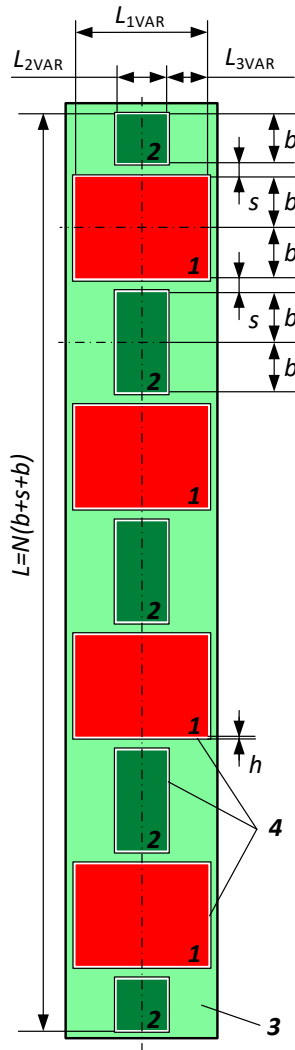


Рис. 2. Система електродів змінного робочого конденсатора

Fig. 2. Electrode system of variable working capacitor

$$C_{12VAR} = NL_{2VAR} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}}}, \quad (1)$$

де $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму, ϵ_r – відносна діелектрична проникність повітря, b – ширина високо-потенціального 1 та низько-потенціального електродів 2, s – відстань між електродом 1 і електродом 2, L_{2VAR} – довжина низько-потенціального електрода 2, d_{VAR} – відстань між загальною площиною електродів 1, 2, 3 і полюсом ротора, N – кількість елементарних сенсорів, утворених електродами 1 і 2 при паралельному з'єднанні.

Довжина електрода 1 вибрана з умови $L_{1VAR} = L_{2VAR} + 2L_{3VAR}$, $L_{3VAR} \geq d_{AGnom}$ (d_{AGnom} – номінальна величина ПП в ГГ) [11].

Конструктивно сенсор [11] є багатошаровою друкованою платою з провідними шарами, між якими розміщено ізолювальні діелектричні шари. У верхньому провідному шарі, орієнтованому до полюса ротора, сформовано систему електродів робочого сенсора, ємність якого змінюється зі зміною ПП. Два інші провідні шари є заземленими. Для мінімізації впливу зовнішнього середовища на результат вимірювання ПП у структуру сенсора ПП [11] пропонується додати нові провідні та ізолювальні шари, з використанням яких сформувати постійний конденсатор з постійним повітряним проміжком, який буде частиною напівдиференціального конденсатора.

На рис. 3 наведено запропоновану конструктивну схему напівдиференціального конденсатора.

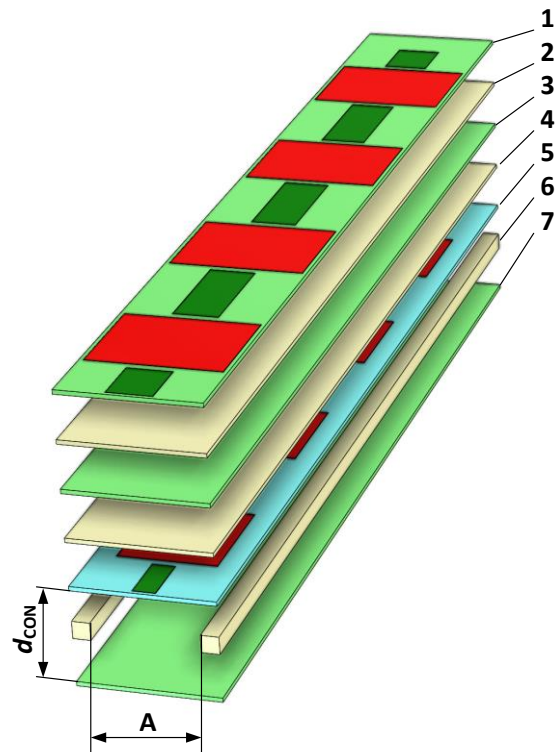


Рис. 3. Схема напівдиференціального ємнісного сенсора ПП

Fig. 3. Half-differential capacitive air gap sensor construction

Сенсор (рис. 3) складається з: тонкого провідного шару 1, в якому сформовано електроди робочого змінного

конденсатора; ізолювального діелектричного шару 2; тонкого заземленого провідного шару 3; ізолювального діелектричного шару 4; тонкого провідного шару 5, в якому сформовано електроди постійного конденсатора; діелектричного ізолювального шару 6 з прорізом; заземленого провідного шару 7.

Товщина діелектричного шару 6 визначає величину відстані d_{CON} між загальною площиною електродів постійного конденсатора і заземленим провідним шаром 7. Ширина A прорізу в шарі 6 вибрана з урахуванням необхідності забезпечити механічну міцність сенсора та можливість вільної вентиляції сенсора (проходження охолоджуючого повітря), визначається технологією виготовлення і матеріалами сенсора (в реальній конструкції має величину в кілька міліметрів).

Постійний конденсатор (рис. 4) зроблено максимально подібним до змінного конденсатора сенсора ПП [11]. Він також містить систему високо-потенціальних 1 і низько-потенціальних електродів 2 з розміщенням між ними заземленим додатковим електродом 3. Кількість елементарних конденсаторів у системі електродів постійного конденсатора така сама, як у змінному, – N . Ширина високо-потенціальних і низько-потенціальних електродів в обох конденсаторах дорівнює b , а відстань між електродом 1 і електродом 2 – s .

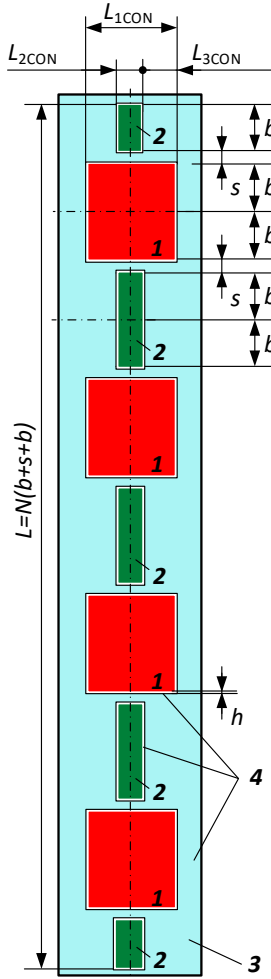


Рис. 4. Система електродів постійного робочого конденсатора

Fig. 4. Electrode system of permanent working capacitor

Довжина $L_{1\text{CONST}}$ високо-потенціального електрода 1 у постійному конденсаторі вибрана з умови $L_{1\text{CON}} \leq A$, а довжина $L_{2\text{CON}}$ низько-потенціального електрода 2 – з умови

$$L_{2\text{CON}} = L_{2\text{VAR}} \frac{L_{1\text{CON}}}{L_{1\text{VAR}}}$$

Електрична ємність $C_{12\text{CON}}$ постійного конденсатора вимірюється між системою електродів 1 і 2, розраховується аналогічно до ємності змінного інформативного конденсатора

$$C_{12\text{CON}} = NL_{2\text{CON}} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\left(\text{th} \frac{\pi s}{4d_{\text{CON}}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{\text{CON}}} \right)^2}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{\text{CON}}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{\text{CON}}}} \right), (2)$$

де $L_{2\text{CON}}$ – довжина низько-потенціального електрода 2 постійного конденсатора, d_{CON} – відстань між загальною площиною електродів 1, 2, 3 постійного конденсатора і провідним шаром 7 (рис. 3).

Як відомо з [13, 14], в разі застосування напівдиференціальної схеми вимірювання фізичних величин інформативні параметри P визначаються як відношення ємності $C_{12\text{VAR}}$ змінного і ємності $C_{12\text{CON}}$ постійного конденсаторів, які входять до складу сенсора. В цьому разі можливі два варіанти визначення інформативного параметра P , як відношення ємності змінного і постійного конденсаторів. Розглянемо ці випадки.

Випадок 1. $P_1 = \frac{C_{12\text{VAR}}}{C_{12\text{CON}}}$. Підставимо значення ємності конденсаторів і отримаємо значення P_1 у вигляді функції від d_{VAR}

$$P_1 = \frac{C_{12\text{VAR}}}{C_{12\text{CON}}} = \frac{NL_{2\text{VAR}} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\left(\text{th} \frac{\pi s}{4d_{\text{VAR}}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{\text{VAR}}} \right)^2}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{\text{VAR}}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{\text{VAR}}}} \right)}{NL_{2\text{CON}} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\left(\text{th} \frac{\pi s}{4d_{\text{CON}}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{\text{CON}}} \right)^2}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{\text{CON}}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{\text{CON}}}} \right)} = \frac{L_{2\text{VAR}}}{L_{2\text{CON}}} \frac{\ln \left(\frac{\left(\text{th} \frac{\pi s}{4d_{\text{VAR}}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{\text{VAR}}} \right)^2}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{\text{VAR}}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{\text{VAR}}}} \right)}{\ln \left(\frac{\left(\text{th} \frac{\pi s}{4d_{\text{CON}}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{\text{CON}}} \right)^2}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{\text{CON}}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{\text{CON}}}} \right)}. (3)$$

Якщо в (3) виділити постійний коефіцієнт

$$K_1 = \frac{L_{2VAR}}{L_{2CON} \ln \left(\frac{\text{th} \frac{\pi s}{4d_{CON}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{CON}}}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{CON}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{CON}}} \right)^2},$$

то формула (3) набуде вигляду

$$P_1 = K_1 \ln \frac{\left(\text{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}} \right)^2}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}}}. \quad (4)$$

$$\text{Випадок 2. } P_2 = \frac{C_{12VAR} - C_{12CON}}{C_{12CON}}.$$

$$P_2 = \frac{C_{12VAR} - C_{12CON}}{C_{12CON}} = \frac{NL_{2VAR} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\text{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}}}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}}} \right)^2 - NL_{2CON} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\text{th} \frac{\pi s}{4d_{CON}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{CON}}}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{CON}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{CON}}} \right)^2}{NL_{2CON} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\text{th} \frac{\pi s}{4d_{CON}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{CON}}}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{CON}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{CON}}} \right)^2 - 1} = \frac{L_{2VAR} \ln \left(\frac{\text{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}}}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}}} \right)^2}{L_{2CON} \ln \left(\frac{\text{th} \frac{\pi s}{4d_{CON}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{CON}}}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{CON}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{CON}}} \right)^2} - 1 \quad (5)$$

Якщо в (5) виділити постійний коефіцієнт

$$K_2 = \frac{L_{2VAR}}{L_{2CON} \ln \left(\frac{\text{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}}}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}}} \right)^2},$$

то формулу (5) можна записати як

$$P_2 = K_2 \ln \left(\frac{\text{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}}}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_{VAR}} \text{th} \frac{\pi s}{4d_{VAR}}} \right)^2 - 1. \quad (6)$$

Як видно з формул (4) і (6), інформативні параметри напівдиференціального ємнісного сенсора повітряного проміжку залежать тільки від зміни відстані між загальною площиною електродів змінного конденсатора та не залежать від зміни параметрів зовнішнього середовища.

Висновки

1. Розроблено конструкцію ємнісного напівдиференціального ємнісного сенсора повітряного проміжку в потужних гідрогенераторах, в якому за рахунок використання як інформативного параметра відношення змінної інформативної ємності до постійної, вбудованій в конструкцію сенсора, усунуто вплив на точність вимірювання параметрів зовнішнього середовища сенсора.
2. Отримані теоретичні результати дають можливість проектувати / створювати реальні конструкції сенсорів з використанням сучасних технологій.
3. Використання сенсора дозволить підвищити точність вимірювання повітряних проміжків у гідрогенераторах під час роботи машин, коли змінюється температура і відносна вологість повітряного середовища, що оточує сенсор ПП.
4. Запропонований сенсор може бути використаний на капсульних гідрогенераторах типу СГК 538/160-70М Київської та Канівської ГЕС.

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 гідроаккумуляційних 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).

ПОСИЛАННЯ

- ISO 19283:2020 (E). Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 с.
- СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Норми випробування електрообладнання. М-во енергетики та захисту довкілля України. Офіц. вид. ПрАТ "НЕК "Укренерго". 238 с.
- 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.
- Air Gap monitoring (Rotor/Stator). VM™ Air Gap. URL: https://www.vibrosystm.com/en/product/vm_air_gap. Accessed at 13.07.2024.
- VM3 & VM5 Airflow For Capacitive Air Gap Measuring Chains. URL: <https://library.vibrosystm.com/en/Datasheets/9628-25D6A-110.pdf>. Accessed at May 13.07.2024.
- 4000 Series Air Gap Sensor System. Datasheet. Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. [Online]. Available: <https://dam.bakerhughes.com/m/4dfdaa01abf81f67/original/4000-Series-Air-Gap-Sensor-System-Datasheet-167885-pdf.pdf>. Accessed at 13.07.2024.
- Iris Power AGTracll. [Online]. Available: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2016/11/Iris-Power-Air-Gap-Condition-Monitoring-AGTracll-Brochure.pdf>. Accessed at 13.07.2024.
- LS121 and ILS731 air-gap measurement system. [Online]. Available: https://catalogue.meggittsensing.com/wp-content/uploads/2020/12/DS_LS121_ILS731-en.pdf. Accessed at 13.07.2024.
- Zaitsev I., Levytskyi A., Bereznichenko V., Rassovskyi V. (2024) Air gap sensors for hydro generators and techniques for air-gap eccentricity fault detection and estimation. In: Power systems research and operation: Selected problems III / editors: Kyrylenko O. and other., vol 512. Springer, Cham. Pp 111–131. DOI:10.1007/978-3-031-44772-3_16.
- Bereznichenko V., Zaitsev I., Levytskyi A., Rassovskyi V. Electrocapacitive air gap sensor with parallel coplanar electrodes for hydrogenerators condition monitoring systems. In: 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES): Proc. of international conference. 27–30 Sept. 2023, Kremenchuk, Ukraine. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402422.
- 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>.
- Zaitsev I., Levytskyi A., Bereznichenko V., Zakusilo S., Rassovskyi V. Application of air gap sensor for improved fault detection and diagnostics tools for hydro generators condition monitoring systems. In: 2023 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek-2023): Proc. of international conference. 7–10 Oct. 2023, Kharkiv, Ukraine. Pp. 1–6, DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312877.
- Гриневич Ф. Б., Новик А. И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками. Киев: Наук. думка. 1987. 112 с.
- Неболюбов Е. Ю., Новик А.И. Электронные преобразователи для работы с емкостными датчиками (аналоговые и цифровые) *Техн. электродинаміка*. 2015. № 3. С. 67–74.

REFERENCES

- ISO 19283:2020 (E). Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 с.
- 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.)
- 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.)
- Air Gap monitoring (Rotor/Stator). VM™ Air Gap. URL: https://www.vibrosystm.com/en/product/vm_air_gap. Accessed at 13.07.2024.
- VM3 & VM5 Airflow For Capacitive Air Gap Measuring Chains. URL: <https://library.vibrosystm.com/en/Datasheets/9628-25D6A-110.pdf>. Accessed at May 13.07.2024.

6. 4000 Series Air Gap Sensor System. Datasheet. Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. [Online]. Available: <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 at 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 at 13.07.2024.
9. Zaitsev I., Levytskyi A., Berezhnychenko V., Rassovskyi V. (2024) Air gap sensors for hydro generators and techniques for air-gap eccentricity fault detection and estimation. In: Power systems research and operation: Selected problems III / editors: Kyrylenko O. and other., vol 512. Springer, Cham. Pp 111–131. DOI:10.1007/978-3-031-44772-3_16.
10. Berezhnychenko V., Zaitsev I., Levytskyi A., Rassovskyi V. Electrocapacitive air gap sensor with parallel coplanar electrodes for hydrogenerators condition monitoring systems. In: 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES): Proc. of international conference. 27–30 Sept. 2023, Kremen-chuk, Ukraine. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402422.
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. Technical electrodynamics. 2023. No. 3. C. 80–85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.080>. (Ukr.)
12. Zaitsev I., Levytskyi A., Berezhnychenko V., Zakusilo S., Rassovskyi V. Application of air gap sensor for improved fault detection and diagnostics tools for hydro generators condition monitoring systems. In: 2023 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek-2023): Proc. of international conference. 7–10 Oct. 2023, Kharkiv, Ukraine. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312877.
13. Grinevich F. B., Novik A. I. Measuring compensation-bridge devices with capacitive sensors. Kyiv: Nauk. dumka. 1987. 112 p. (Rus.)
14. Nebolubov E. Yu., Novik A. I. Electronic converters for working with capacitive sensors (analog and digital) Tech. electrodynamics. 2015. No. 3. Pp.67–74. (Rus.)