

**КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ  
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

DOI: 10.20535/1970.70(2).2025.347948

УДК 621.317.39

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЄМНІСНОГО ВИМІРЮВАЧА ПОВІТРЯНОГО  
ПРОМІЖКУ МІЖ СТАТОРОМ ТА РОТОРОМ У ГІДРОГЕНЕРАТОРАХ НА  
ОСНОВІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО МЕТОДУ***Левицький А. С., Зайцев Є. О., Закусило С. М.**Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, Україна**E-mail: [levitskiyanatoliymail@gmail.com](mailto:levitskiyanatoliymail@gmail.com), [zaitsev@i.ua](mailto:zaitsev@i.ua)*

Повітряний проміжок (ПП) між статором і ротором гідрогенератора (ГГ) відіграє визначальну роль у формуванні електромагнітного поля машини, тому його номінальне значення має підтримуватись із високою точністю. Відхилення цієї величини може спричинити зниження динамічної стійкості та надійності роботи агрегату. Тому є необхідність постійного контролю ПП як в процесі роботи ГГ, так під час оглядів і ремонтів з використанням ефективних сучасних методів вимірювання та діагностування. Метою даної статті є створення та дослідження ємнісного вимірювача (ЄВ) ПП, який порівняно з аналогами забезпечує більш високу точність вимірювання. Основними функціональними частинами запропонованого ЄВ є ємнісний сенсор (ЄС), блок вимірювання (БВ), який використовується в якості вторинного вимірювального перетворювача і з'єднувальні кабелі. ЄС складається зі змінного та постійного вимірювальних конденсаторів, і інформативним параметром ЄВ є відношення ємностей зазначених конденсаторів, що дає можливість усунути вплив на точність вимірювання зміни параметрів повітряного середовища, що оточує ЄС: температури і відносної вологості. Описано конструктивну схему ЄС, яка запропонована до реалізації як багатошарова друкована плата з тонкими провідними та діелектричними шарами. В провідних шарах сформовані електроди змінного та постійного вимірювальних конденсаторів, а також екрануючі поверхні. Зазначено, що для забезпечення оптимальної функції перетворення ЄВ електрична ємність постійного конденсатора повинна бути рівною ємності змінного конденсатора в середині його діапазону вимірювання. Плоский активний електрод змінного конденсатора для усунення впливу крайових ефектів оточений по периметру плоским охоронним електродом, потенціал якого дорівнює потенціалу активного електрода, але вони не зв'язані між собою гальванічно. При цьому змінний вимірювальний конденсатор з'єднаний з блоком вимірювання кабелем з подвійним екраном, в якому центральна жила з'єднана з активним електродом, внутрішній екран із охоронним електродом, а зовнішній із землею. Визначено аналітичні залежності для функції перетворення ЄВ ПП, призначеного для використання на ГГ будь якого типу. Показано графік функції перетворення ЄВ, який призначений для використання на ГГ типу СВ 1230/140-56. Вимірювач може бути використаний як окремий прилад, так і як складова частин систем моніторингу та діагностування ГГ.

**Ключові слова:** гідрогенератор, статор, ротор, повітряний проміжок, вимірювання, ємнісний сенсор.

**Вступ. Постановка проблеми**

Повітряний проміжок (ПП) між поверхнею розточення осердя статора та поверхнею полюсів ротора в потужному гідрогенераторі (ГГ) потребує постійного контролю в процесі експлуатації, оскільки відхилення його значення від нормативного безпосередньо впливає на ефективність роботи машини. Навіть незначні зміни ПП можуть суттєво позначитися на електромагнітних характеристиках, надійності, функціональності та продуктивності ГГ. Міжнародні та державні нормативні документи [1, 2] вимагають, щоб значення ПП в діаметрально протилежних точках розточення осердя статора ГГ повинні відрізнятись один від одного не більше, ніж на  $\pm 20\%$ , якщо заводськими інструкціями не передбачені більш жорсткі норми.

Для контролю та запобігання такого відхилення, особливо в процесі експлуатації ГГ, необхідно застосовувати вимірювачі ПП з високими метрологічними характеристиками і функціональними можливостями.

Тому, для вирішення завдання достовірного контролю ПП в ГГ на даний час найбільшого поширення набули автоматизовані вимірювачі на базі ємнісних сенсорів, які виконані в формі пластини, що закріплюється на розточенні осердя статора [3]. Електрична ємність сенсорів залежить від величини ПП, тобто від відстані між обвідною полюсів ротора та поверхнею розточення осердя статора. На рис. 1 наведено схему встановлення сенсорів на поверхні розточення осердя статора ГГ, де показано: 1 – осердя статора ГГ; 2 – ротор

ГГ; 2.1 – полюс ротора ГГ; 3 – повітряний проміжок (ПП) між розточенням осердя статора і полюсом ротора; 4 – ємнісний сенсор

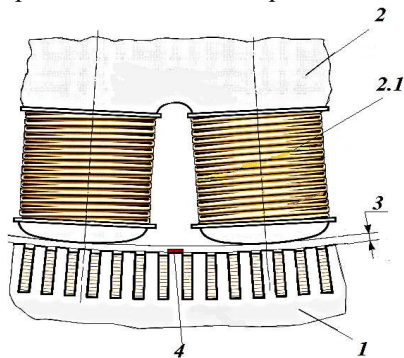


Рис. 1

Широке застосування ємнісних сенсорів для вимірювання ПП в ГГ зумовлене тим, що вони 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 за серійного виробництва, нескладні у виготовленні і налагодженні. Достатня інформативність контролю ПП з використанням системи ємнісних сенсорів, особливо для контролю форми розточення статора ГГ, досягається завдяки встановленню необхідної кількості сенсорів. Найвідоміші світові компанії, які серійно виготовляють 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 та температури на функцію перетворення сенсора (залежність зміни вихідної величини від зміни вхідних параметрів, тобто зміни значення ПП).

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 [3, 11] та інші. В той же час дослідження впливу параметрів зовнішнього середовища на ємнісні сенсори ПП, запропонованих в [3, 9-11], не проводились, а інформація для ємнісних сенсорів інших компаній у відкритих джерелах є відсутньою. Тому вирішення задачі мінімізації впливу зовнішніх параметрів на результат вимірювання значення ПП ємнісними сенсорами в гідрогенераторах [3, 9-11] є актуальним. Одним із шляхів досягнення мінімізації впливу є удосконалення структурної схеми вимірювача ПП шляхом застосування диференційної схеми

вимірюваних ємностей, що дозволить уникнути впливу зміни параметрів повітряного середовища, яке оточує сенсори в ГГ.

**Метою** даної роботи є визначення характеристик диференціального ємнісного сенсора повітряного проміжку в гідрогенераторах, в якому мінімізовано похибку вимірювання, зумовлену впливом зміни параметрів повітряного середовища, що оточує ємнісний сенсор.

#### Матеріали та методи досліджень

Під час вимірювання ємнісними вимірювачами ПП в потужних ГГ важливо зменшити вплив неінформативних параметрів на результати вимірювань, а саме: температурних змін геометричних розмірів електродів ємнісних сенсорів, змін відносної вологості повітряного середовища в робочому середовищі сенсорів, які впливають на діелектричну проникність середовища, що, у свою чергу, призводить до зміни функції перетворення.

Оптимальним та ефективним зменшенням впливу є застосування диференційної схеми вимірювання [12, 13]. В цьому випадку ємнісний сенсор складається з двох частин, причому ємність одної частини зі збільшенням вимірювального параметра збільшується, а іншої – зменшується, і навпаки. Інформативним параметром диференціального сенсора є відношення ємностей складових частин. Така схема вимірювання ємностей сенсора зменшує вплив на результати вимірювань зовнішніх факторів, таких як коливання температури або відносної вологості, оскільки ці фактори впливають на обидві вимірювальні ємності однаково. Але для перспективного вимірювача ПП, описаного в [3, 10], класичну диференціальну схему вимірювання через конструктивні складності застосувати неможливо.

Тому пропонується удосконалити вимірювач, застосувавши модифікований диференціальний метод вимірювання [12, 13], додавши в конструкцію сенсора наряду зі змінним робочим вимірювальним конденсатором постійний вимірювальний конденсатор з електродами, геометрично подібними змінному конденсатору з подальшим обчисленням відношення ємностей зазначених конденсаторів, яке при цьому є інформативним параметром ЄВ.

В результаті практично виключається вплив на функцію перетворення вимірювача температури і відносної вологості повітряного середовища, що оточує сенсор в ГГ, оскільки вони однаково впливають як на ємність змінного конденсатора, яка функціонально залежить від величини вимірюваного ПП, так і на ємність постійного конденсатора.

Схему вимірювання ПП змінним конденсатором ємнісного сенсора, наведеним в [3, 10], показано на рис. 2.

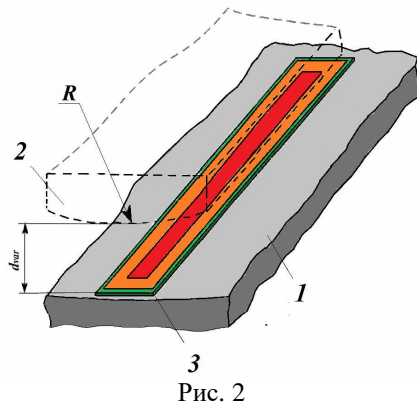


Рис. 2

На рис. 2 показано: 1 – розточення осердя статора ГГ; 2 – полюс ротора ГГ; 3 – емісійний сенсор ПП;  $d_{VAR}$  – відстань між поверхнею електродів сенсора 3 і полюсом ротора.

Зі зміною відстані  $d_{VAR}$  змінюється електрична ємність  $C_{VAR}$  між ними, тобто  $C_{VAR} = f(d_{VAR})$ .

Побудова та принцип роботи запропонованого ЄВ ПП: наведено на рис. 3 структурну схему ЄВ, а рис. 4 – конструктивну схему ЄС зі змінним і постійним вимірювальним конденсаторами.

Для вимірювання ПП між статором 1 і ротором 2 в ГГ застосовано ємнісний сенсор (ЄС) 3, закріплений на розточенні осердя статора 1.

Конструктивно цей ЄС є багатошаровою друкованою платою, в якій чергуються тонкі провідні і діелектричні ізолюючі шари: провідний шар 3.1 з електродами змінного вимірювального конденсатора; ізоляційний діелектричний шар 3.2; провідний заземлений шар 3.3; ізоляційний діелектричний шар 3.4; тонкий провідний шар 3.5 з електродами постійного вимірювального конденсатора; дистанційний ізоляційний діелектричний шар 3.6; провідний заземлений шар 3.7.

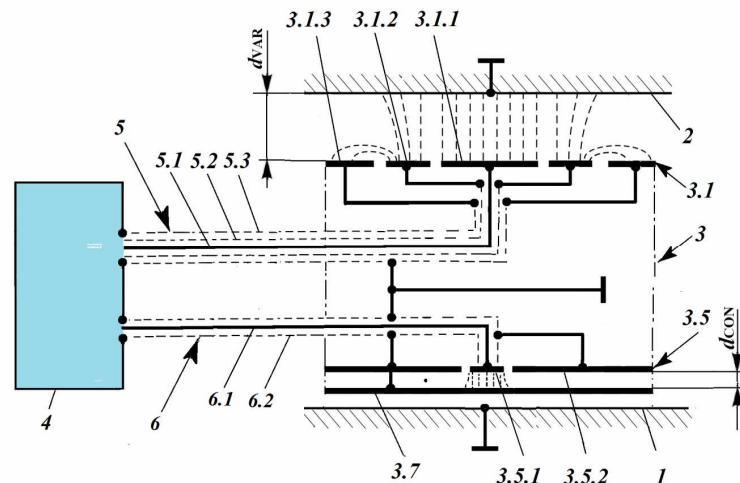


Рис. 3

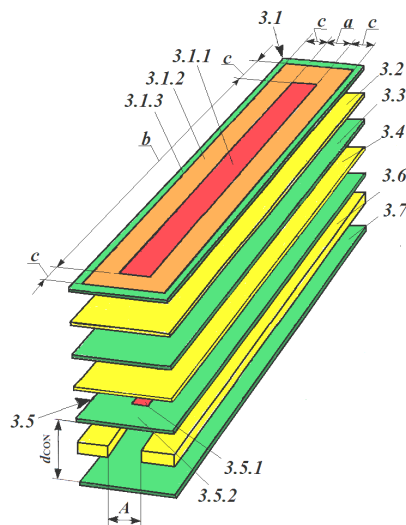


Рис. 4

В провідному шарі 3.1 сформовано електроди змінного вимірювального конденсатора (рис. 3 – рис. 5): активний електрод 3.1.1, охоронний електрод 3.1.2, екранний заземлений електрод 3.1.3.

Охоронний електрод 3.1.2 розміщений по периметру активного електрода 3.1.1 і відокремлений від нього тонкими діелектричними проміжками 3.1.4.

На електроди 3.1.1 і 3.1.2 подається однаковий потенціал, але вони не з'єднані між

собою гальванічно. Така геометрія електродів і рівність потенціалів забезпечують в робочому проміжку змінного вимірювального конденсатора практично рівномірне електричне поле, що усуває вплив крайових ефектів на точність вимірювання.

Активний електрод 3.5.1 і заземлений електрод 3.5.2 постійного вимірювального конденсатора сформовано в тонкому провідному шарі 3.5 (рис. 6).

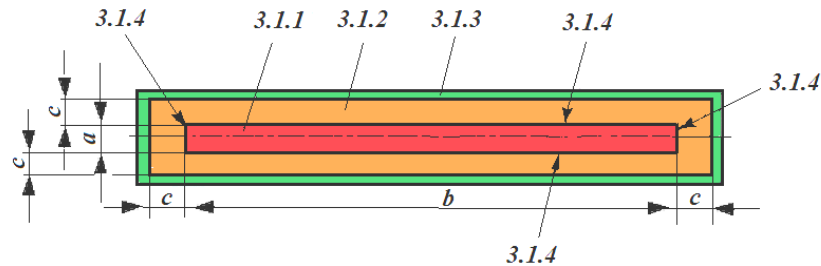


Рис. 5

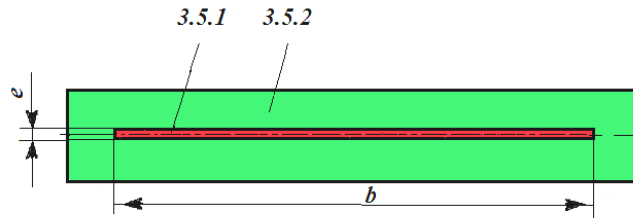


Рис. 6

Змінний конденсатор з'єднаний з блоком вимірювання 4 кабелем з подвійним екраном 5, в якому центральна жила 5.1 під'єднує активний електрод 3.1.1, внутрішній екран 5.2 – охоронний електрод 3.1.2, а зовнішній екран 5.3 – екранний електрод 3.1.3. Постійний конденсатор, в свою чергу, з'єднаний з блоком 4 звичайним екранованим кабелем 6, в якому центральна жила 6.1 під'єднує активний електрод 3.1.1, екран 6.2 – заземлений електрод 3.5.2.

Під час зміни значення ПП  $d_{VAR}$  (відстані між загальною площиною електродів 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 сенсора 3 і полюсом ротора 2 рис. 3, рис. 4) буде змінюватись електрична ємність  $C_{VAR} = f(d_{VAR})$  змінного вимірювального конденсатора ємнісного сенсора, яка буде складати [3]

$$C_{VAR} = \epsilon \epsilon_0 b \int_0^a \frac{dx}{d_{VAR} + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = \varphi$$

$$= 2\epsilon \epsilon_0 b \left\{ \frac{(d_{VAR} + R)}{\sqrt{d_{VAR}^2 + 2Rd_{VAR}}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{d_{VAR}^2 + 2Rd_{VAR}}} + \right.$$

$$\left. + \sqrt{a^2 + b^2} [F(\varphi, k) - E(\varphi, k)] + \sqrt{\frac{b^2 - y^2}{y^2 + b^2}} \right\}, \quad (1)$$

де:  $y^2 = d_{VAR}^2 + 2Rd_{VAR} + x^2$ ,  $F(\varphi, k)$  – еліптичний інтеграл першого роду з кутом  $\varphi$  і модулем  $k$ ;  $k$  – еліптичний інтеграл другого роду з кутом  $\varphi$  і модулем  $k$ ;  $\varphi = \arcsin \frac{y}{\sqrt{a^2 + b^2}}$ ;  $k = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$ ;

$0 \leq x \leq a/2$ ;  $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – діелектрична проникність вакууму;  $\epsilon_r = 1,00056$  – відносна діелектрична проникність повітря;  $a$  – ширина активного електрода змінного конденсатора 3.1.1 (рис. 5);  $b$  – довжина активного електрода змінного конденсатора 3.1.1 (рис. 5);  $d_{VAR}$  – відстань між загальною площиною електродів 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 і полюсом ротора 2 (рис. 2, рис. 3);  $R$  – радіус кривизни поверхні полюса ротора.

Ширина  $h$  діелектричних проміжків 3.1.4 між електродами 3.1.1 і 3.1.2 для усунення впливу крайових ефектів вибирається мінімальною з урахуванням можливостей технології виготовлення електродів. Сучасні технології виготовлення плівкових провідних поверхонь дають змогу виконувати діелектричні проміжки шириною  $h = 50 \div 100$  мкм. При цьому вплив крайових ефектів, зумовлених кінцевою шириною  $h$ , буде

мінімальним, і під час розрахунків  $C_{VAR}$  за формулою (1) величина  $h$  не враховується.

Ємність постійного конденсатора  $C_{CON}$  в сенсорі без урахування крайового ефекту визначиться як [3]

$$C_{CON} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{e \cdot b}{d_{CON}}, \quad (2)$$

де  $e$  – ширина активного електрода постійного конденсатора 3.5.1 (рис.6);  $b$  – довжина активного електрода постійного конденсатора 3.5.1 (рис. 6); – відстань між загальною площиною електродів 3.5 і заземленим провідним шаром 3.7 (рис. 3, рис. 4).

Товщина діелектричного шару 3.6 визначає величину  $d_{CON}$ . Через виріз  $A$  в шарі 3.6 повітря, що оточує сенсор, поступає до електродів постійного конденсатора. Ширина  $A$  прорізу в шарі 3.6 вибрана з урахуванням необхідності забезпечити механічну міцність сенсора та можливість вільної вентиляції сенсора (проходження охолоджуючого повітря), визначається технологією виготовлення сенсора і застосовуваними матеріалами.

В роботі [12] показано, що під час використання диференціальної схеми для забезпечення оптимальної функції перетворення ємність постійного конденсатора вибирається рівною ємності змінного вимірювального конденсатора в середині його діапазону вимірювання. В процесі виконання досліджень було створено ємнісний сенсор ПП для використання на ГГ типу СВ 1230/140-56 із номінальним значенням ПП 30 мм. На рис. 7 показано графік зміни ємності  $C_{VAR} = f(d_{VAR})$  змінного конденсатора сенсора в діапазоні  $10 \text{ мм} < d_{VAR} \leq 50 \text{ мм}$ . Для розрахунку використані наступні значення:  $a = 30 \text{ мм}$  – ширина активного електрода змінного конденсатора 3.1.1;  $b = 200 \text{ мм}$  – довжина активного електрода змінного конденсатора 3.1.1;  $R = 1230 \text{ мм}$  – радіус кривизни поверхні полюса ротора ГГ.

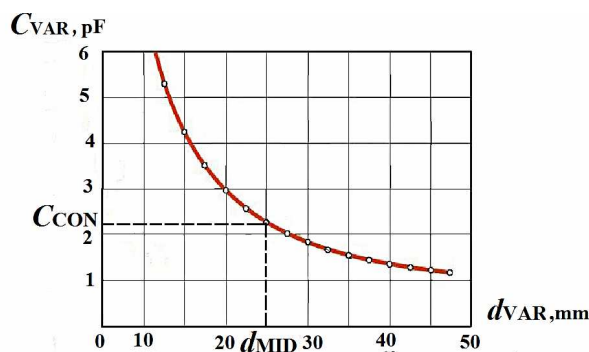


Рис. 7

Як видно з рис. 7, ємність  $C_{VAR}$  змінного конденсатора змінюється в межах

$1 \text{ пФ} \leq C_{VAR} \leq 6 \text{ пФ}$ , а для середини діапазону вимірювання змінного конденсатора ( $d_{MID} = 25 \text{ мм}$ ) ємність постійного конденсатора  $C_{CON}$  складе 2,25 пФ.

Як відомо з [12, 13], у випадку застосування модифікованої диференціальної схеми вимірювання фізичних величин для усунення впливу температури і вологості повітряного середовища, що оточує сенсор, в якості інформативного параметра

сенсора  $P$  використаємо відношення  $P_1 = \frac{C_{VAR}}{C_{CON}}$ ,

або  $P_2 = \frac{C_{VAR} - C_{CON}}{C_{CON}}$ , де  $C_{VAR}$  – змінна електрична

ємність, величина якої залежить від вимірюваного параметру,  $C_{CON}$  – постійна електрична ємність.

Враховуючи формули (1) і (2), визначимо  $P_1$  і  $P_2$

$$P_1 = \frac{C_{VAR}}{C_{CON}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \int_0^a \frac{dx}{d_{VAR} + R - \sqrt{R^2 - x^2}}}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{e \cdot b}{d_{CON}}} = \frac{d_{CON} \int_0^a \frac{dx}{d_{VAR} + R - \sqrt{R^2 - x^2}}}{e} \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{C_{VAR} - C_{CON}}{C_{CON}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \int_0^a \frac{dx}{d_{VAR} + R - \sqrt{R^2 - x^2}} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{eb}{d_{CON}}}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{e \cdot b}{d_{CON}}} = \frac{d_{CON} \int_0^a \frac{dx}{d_{VAR} + R - \sqrt{R^2 - x^2}}}{e} - 1. \quad (4)$$

З аналізу формул (3) і (4) видно, що на інформативні параметри  $P_1$  і  $P_2$  не впливає:

1) відносна діелектрична проникність повітря  $\varepsilon_r$ , яка залежить від зміни відносної вологості;

2) температура повітря, оскільки зі зміною температури розміри змінного і постійного конденсаторів змінюються однаково.

Тобто в такому сенсорі зміна параметрів повітряного середовища, що оточує ємнісний сенсор, не впливає на точність вимірювання.

### Висновки

1. Створено СВ ПП в потужних ГГ, який базується на застосуванні модифікованого диференціального ємнісного сенсора, в якому за рахунок використання в якості 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 вимірювачі ПП в ГГ із застосуванням ємнісних сенсорів, в яких використані сучасні технології.

3. Використання вимірювача дозволить підвищити точність вимірювання ПП в ГГ під час роботи машин, коли змінюється температура і відносна вологість повітряного середовища, що оточує сенсор ПП.

*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).*

#### Література

- [1] ISO 19283:2020 (E). Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 с.
- [2] СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Норми випробування електрообладнання. М-во енергетики та захисту довкілля України. Офіц. вид. ПрАТ "НЕК "Укренерго". 238 с.
- [3] А. С. Левицький, Г. М. Федоренко, О. П. Грубой, *Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів*. Київ, Україна: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011.
- [4] Air Gap monitoring (Rotor/Stator). VM™ Air Gap. URL: [https://www.vibrosystm.com/en/product/vm\\_air\\_gap](https://www.vibrosystm.com/en/product/vm_air_gap).
- [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. [Online]. Available: <https://dam.bakerhughes.com/m/4dfdaa01abf81f67/original/4000-Series-Air-Gap-Sensor-System-Datasheet-167885-pdf.pdf>.
- [7] Iris Power AGTracII. [Online]. Available: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2016/11/Iris-Power-Air-Gap-Condition-Monitoring-AGTracII-Brochure.pdf>.
- [8] LS121 and ILS731 air-gap measurement system. [Online]. Available: [https://catalogue.meggittsensing.com/wp-content/uploads/2020/12/DS\\_LS121\\_ILS731-en.pdf](https://catalogue.meggittsensing.com/wp-content/uploads/2020/12/DS_LS121_ILS731-en.pdf).
- [9] В. Л. Рассовський, А. С. Левицький, Є. О. Зайцев, «Завадостійкий ємнісний сенсор для визначення повітряного зазору в потужному гідроенергетичному агрегаті», *Гідроенергетика України*, № 3-4, с. 42 – 45, 2021. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2021-12/12.pdf>.
- [10] С. І. Потапашник, К. В. Волинський, О. П. Грубой, А. С. Левицький, Є. Ю. Неболюбов, А. І. Новік, Г. М. Федоренко, А. К. Шофур, «Спосіб вимірювання повітряного зазору між статором і ротором в гідроенергетичному агрегаті та пристрій для його реалізації», Пат. 86524 Україна, МПК G01B 7/14, G01R 27/26. № а 2007 12431, 27.04.09, Бюл. № 8.
- [11] А. С. Левицький, В. Л. Рассовський, Є. О. Зайцев, «Ємнісний сенсор з системою компланарних електродів для вимірювання повітряного зазору в гідроенергетичних агрегатах», *Технічна електродинаміка*, № 3, с. 80 – 85, 2023. DOI: 10.15407/techne2023.03.080.
- [12] Ф. Би. Гриневич, А. І. Новик, *Вимірювальні компенсаційно-мостові пристрої з ємнісними датчиками*. Київ: Наук. думка. 1987.
- [13] Е. Ю. Неболюбов, А. І. Новік, «Електронні перетворювачі для роботи з ємнісними датчиками (аналогові та цифрові)», *Техн. електродинаміка*, № 3, с. 67-74, 2015.

UDC 681.5

**A. S. Levitskyi, Ie. O. Zaitsev, A.S. Zakusilo**

*Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

#### INCREASING ACCURACY OF CAPACITIVE AIR GAP METER BETWEEN STATOR AND ROTOR IN HYDROGENERATORS BASED ON DIFFERENTIAL METHOD

The air gap (AG) between the stator and rotor of the hydrogenerator (GG) has a strong influence on the formation of the electromagnetic field of the machine, therefore its nominal value must be maintained with high accuracy. Deviation of this value can cause a decrease in the dynamic stability and reliability of the unit. Therefore, there is a need for constant monitoring of the air gap both during the operation of the GG and during inspections and repairs using effective modern measurement and diagnostic methods. The purpose of this article is to create and study the capacitive meter (CM) AG, which, in comparison with analogues, provides higher measurement accuracy.

The main functional parts of the proposed EV are the capacitive sensor (CS), the measurement unit (MU), which is used as a secondary measuring transducer, and connecting cables. CS consists of variable and constant measuring capacitors,

and the informative parameter CM is the ratio of the capacitances of these capacitors, which makes it possible to eliminate the influence on the accuracy of measurement of changes in the parameters of the air environment surrounding the CS: temperature and relative humidity. The structural scheme of the CS is described, which is proposed for implementation as a multilayer printed circuit board with thin conductive and dielectric layers. The electrodes of the variable and constant measuring capacitors, as well as shielding surfaces, are formed in the conductive layers. It is noted that to ensure the optimal EV conversion function, the electrical capacitance of the constant capacitor should be equal to the capacitance of the variable capacitor in the middle of its measurement range. To eliminate the influence of edge effects, the flat active electrode of the variable capacitor is surrounded around the perimeter by a flat guard electrode, the potential of which is equal to the potential of the active electrode, but they are not galvanically connected to each other. In this case, the variable measuring capacitor is connected to the measuring unit by a cable with a double shield, in which the central core is connected to the active electrode, the inner shield to the protective electrode, and the outer to the ground.

Analytical dependencies are determined for the CM AG conversion function, intended for use on GG of any type. The graph of the EV conversion function, intended for use on GG of type SV 1230/140-56, is shown. The meter can be used as a separate device, or as a component of GG monitoring and diagnostic systems.

**Keywords:** hydrogenerator, stator, rotor, air gap, measurement, capacitive sensor.

*Надійшла до редакції  
06 серпня 2025 року*

*Рецензовано  
29 жовтня 2025 року*



© 2025 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).