

УДК 621.317.39

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-18

Рассовський В. Л.¹, Зайцев Є. О.², Левицький А. С.¹¹ ПрАТ «Укргідроенерго»² Інститут електродинаміки Національної академії наук України

ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ В ГІДРОГЕНЕРАТОРІ З СИСТЕМОЮ КОМПЛАНАРНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

В роботі описано конструкційні, схемні та технологічні особливості ємнісного сенсора повітряного проміжку (ПП) між розточенням осердя статора та полюсами ротора в капсульному гідрогенераторі (ГГ) типу, утвореного системою стрічкових паралельних компланарних електродів. Система містить високо потенціальні, низько потенціальні та заземлені електроди. Зміна електричної ємності між системою високо потенціальних електродів і системою низькопотенціальних електродів функціонально залежить від зміни відстані між загальною площиною електродів сенсора в полюсами ротора, тобто від величини повітряного проміжку. Викладено методіку експериментального визначення функції перетворення сенсора. Описано застосоване обладнання та вимірювальні прилади. В методиці досліджень для імітації зміни ПП передбачено застосування спеціального пристрою для плоско паралельного переміщення плоскої заземленої пластини, яка є імітацією поверхні полюса ротора в машині. Пластина переміщується кареткою пристрою відносно загальної поверхні електродів сенсора, який на пристрої закріплюється нерухомо. Задавання переміщення та його реєстрація здійснюється мікрометричною голівкою. Отримані табличні та графічні дані, які ілюструють експериментально визначену функцію перетворення. Проведене порівняння експериментальних результатів з теоретичними засвідчило вірність запропонованих принципів побудови сенсора. Використання сенсора дозволяє підвищити точність вимірювання ПП в ГГ типу, що в кінцевому рахунку покращить оцінку поточного технічного стану машини.

Ключові слова: гідрогенератор, повітряний проміжок між статором і ротором, ємнісний сенсор, експериментальний зразок.

Постановка проблеми. Одним з найважливіших параметрів потужного гідрогенератора (ГГ) є повітряний проміжок (ПП) між полюсами ротора і поверхнею розточення осердя статора. ПП в значній мірі визначає характеристики машини та її роботу в процесі експлуатації. Величина ПП істотно впливає на торцеві магнітні потоки і втрати, що викликаються ними в крайніх пакетах осердя і натискних плитах, на значення і розподіл втрат на поверхні полюсів ротора, а також на області допустимих режимів роботи ГГ [1]. Саме через це контроль за величиною ПП необхідно здійснювати, як процесі оглядів машини, так і в процесі роботи.

У відповідності до чинних державних та міжнародних нормативних документів [2,3] повітряні проміжки в ГГ, величини яких є порівняно невеликими в порівнянні з діаметрами розточення осердя статора, в діаметрально протилежних точках можуть відрізнятися один від одного не більше, ніж на $\pm 20\%$, якщо заводськими інструкціями не передбачені більш жорсткі норми. Особливо важливо здійснювати контроль ПП в під час роботи ГГ. Це пов'язано, насамперед з тим, що в динаміці, при наборі обертів і роботі під навантаженням відбуваються процеси, які впливають на величину і форму ПП [4]. Зазначені процеси зумовлюються дією відцентрових сил, викликаних невірноваженістю обертових мас ротора, тепловим і динамічним прогином вала тощо [5–7].

Аналіз останніх досліджень. Для вирішення завдання достовірного контролю ПП в ГГ на даний час найбільшого поширення набули автоматизовані вимірювачі на базі ємнісних сенсорів (ЄС), які виконані в формі пластини, яка закріплюється на розточенні осердя статора [8]. Ємнісні сенсори мають відносно високі метрологічні характеристики, нечутливі до впливу потужних електромагнітних полів, а діапазон їх робочих температур визначається лише стійкістю матеріалів, що застосовуються. Сенсори легко піддаються розрахунку та відтворенню, у тому числі при масовому і серійному виробництві, нескладні у виготовленні і 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) [9], Bently Nevada (США) [10], Iris Power (Канада, США) [11], Meggitt SA (Швейцарія) [12].

Аналіз науково-технічних джерел показав, що зазначені компанії не публікують даних про геометрію електродів ємнісних сенсорів і даних з оцінки впливу на функції перетворення геометричних параметрів ГГ, насамперед радіуса кривизни полюса ротора. В ІЕД НАН України було створено і досліджено ряд ємнісних сенсорів ПП в ГГ, для яких було проведено розрахунки з оцінки зазначеної похибки [8]. Встановлено, що зазначена похибка збільшується зі збільшенням поперечних розмірів електродів сенсора (перпендикулярних твірній розточення осердя) і зменшенням радіуса полюсу ротора. За мінімальних проміжків відносна похибка вимірювання може досягати десятих долей процента. Подальшим розвитком робіт в цьому напрямку було створення в ІЕД НАН України нового ємнісного сенсора ПП з системою компланарних паралельних електродів [13], в якому забезпечено мінімізацію похибки вимірювання від кривизни полюса ротора. Сенсор призначений для використання на капсульних ГГ типу СГК 538/160-70М Київської та Каневської ГЕС України. В процесі виконання робіт на базі теоретичних досліджень було виготовлено експериментальні зразки сенсорів.

Метою даної роботи є викладення результатів експериментального визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку в гідрогенераторі типу СГК538/160-70М та їхній аналіз.

Викладення основного матеріалу. До складу сенсора (рис. 1) входять стрічкові, паралельні між собою і перпендикулярні твірній розточення осердя статора низькопотенціальні електроди 1, високопотенціальні електроди 2 та додатковий заземлений електрод 3, які розміщені в одній площині. Додатковий електрод 3 розташований навколо високопотенціальних і низькопотенціальних електродів та між ними. Електроди 1, 2 і 3 розміщені в одній площині і відокремлені один від одного діелектричними проміжками 4. Всі електроди утворені тонким металевим шаром (наприклад, міді), нанесеним на плоску діелектричну пластину 5. На зворотній стороні пластини розміщений заземлений електрод 6 і цією стороною сенсор встановлюється на розточення осердя статора. Загальна товщина пластини сенсора дорівнює δ .

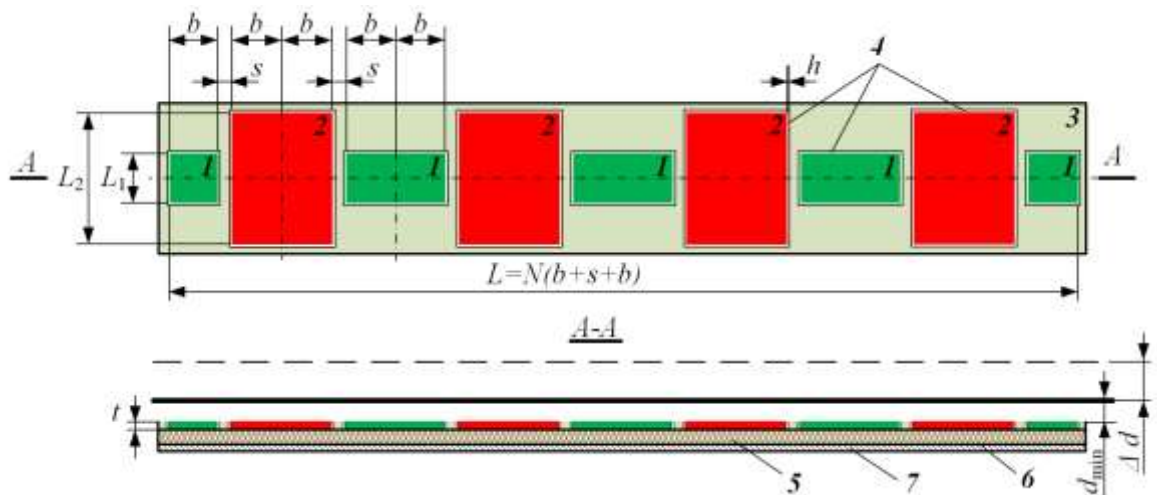


Рисунок 1 – Ємнісний сенсор ПП з системою компланарних паралельних електродів

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 7. Як визначено в [13], ця ємність визначається формулою (1)

$$C_{12} = N \cdot L_1 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (1)$$

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 електродом 1 і електродом 2, L_1 – 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 при паралельному з'єднанні.

Вимірюючи C_{12} за формулою (1), визначають відстань d , а потім знаходять величину ПП в ГГ як

$$d_{AG} = d + \delta, \quad (2)$$

де d_{AG} – величина ПП в ГГ;

δ – товщина пластини сенсора.

На базі теоретичних досліджень, наведених в [13,14] була розроблена технічна документація і виготовлено експериментальні зразки ємнісних сенсорів ПП, призначених для використання на капсульному ГГ. При цьому враховувались номінальна величина ПЗ $d_{AGnom} = 6$ мм в цьому ГГ і ширина зубця заліза в осердя статора машини, рівна 57 мм На рис.2 показано тестове встановлення виготовленого зразка сенсора на зубці розточені статора капсульного ГГ типу SGK 538/160-70М.



Рисунок 2 – Розміщення сенсора ПП:
1 - сенсор ПП; 2 - зубець розточення статора; 3 - полюс ротора.

Конструкція сенсора та технологія виготовлення. Загальна довжина пластини сенсора 210 мм, ширина 32 мм. Розміри електродів (рис. 1): $L_1=10$ мм; $L_2=30$ мм (довжина високопотенціального електрода 2); $2b=24$ мм (ширина високопотенціального електрода 2) 1; $b=12$ мм (ширина низькопотенціального електрода 1); $s=2$ мм (ширина додаткового електрода 3 між електродами 1 і 2); $h=0,02$ мм (ширина діелектричних проміжків 4). Довжина електрода 1 вибрана із умови $L_2 = L_1 + 2l_3$, $l_3 \geq d_{AGnom}$ (рис. 1). Якщо при цьому проміжки h є нескінченно малими, то в результаті електричне поле між електродами 1 і 2 в кожному перетині, перпендикулярному їх довжині буде двовимірним і матиме однакоvu форму. До того ж за цієї умови на поздовжніх сторонах електрода 1 значно зменшується вплив крайових ефектів.

Дослідження, проведені в [13,14], показали, що для зменшення нелінійності функції перетворення ширина частини додаткового електрода поміж високопотенціальним та низькопотенціальним повинна вибиратись із умови $b/s \geq 6$, $d_{max}/s \leq 10$ ($d_{max} = 12$ мм – максимальний проміжок в гідрогенераторі). Експериментальний зразок сенсора виготовлений з застосування технології багатошарових друкованих плат. З урахуванням вартості та можливостей технології виготовлення друкованих плат значення h обрано 0,1 мм. На рис.3 показано схематичний переріз сенсора як багатошарової плати з характеристиками провідних та діелектричних шарів, які були сформовані під час виготовлення сенсора ПП.

| Номер шару | Тип шару | Товщина шару, мкм | Значення діелектричної проникності шару, ϵ |
|------------|------------|-------------------|---|
| 1 | Мідь | 0,036 | |
| 2 | Діелектрик | 0,071 | 4,1 |
| 3 | Мідь | 0,036 | |
| 4 | Діелектрик | 0,32 | 4,8 |
| 5 | Діелектрик | 0,071 | 4,1 |
| 6 | Мідь | 0,036 | |

Рисунок 3 – Провідні і діелектричні шари пластини ємнісного сенсора

В мідному шарі 1 сформовані методом фотолітографії електроди 1,2 і 3 сенсора. В шарі 3 – провідники, що з'єднують між собою електроди 1, а також між собою електроди 2. В цьому ж шарі передбачені контакти для під'єднання вивідних провідників сенсора. Шар 6 – заземлена провідна поверхня, яка екранує сенсор. Діелектричні шари 2, 4 і 5 є ізоляторами між провідними шарами. Наявність шарів 4 та 5 обумовлена технологічним процесом, який був використаний для виготовлення сенсорів методом багатошарових друкованих плат.

Обладнання, прилади та матеріали. На рисунку 4-6 показано обладнання, яке було застосоване для виконання досліджень. де: 1 – спеціальний пристрій з мікрометричною голівкою 2 для задавання плоско-паралельного переміщення спеціальної заземленої плоскої пластини 4 відносно загальної поверхні електродів сенсора. 5 – вимірювач електричної ємності типу Eucol 2836 LCR Meter.

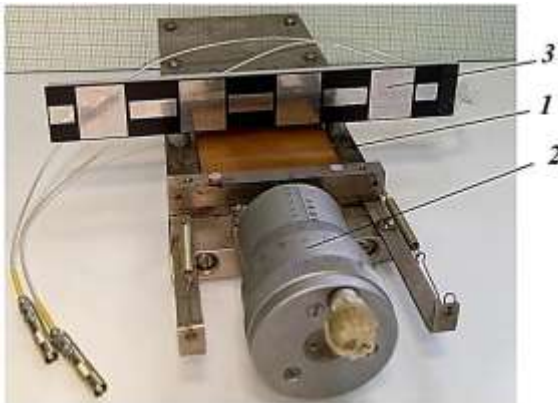


Рисунок 4 – Встановлення сенсора на пристрої

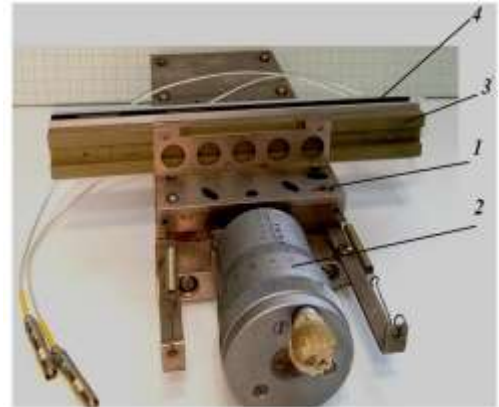


Рисунок 5 – Встановлення сенсора і заземленої поверхні на пристрої

Перед встановленням на випробувальний пристрій поверхня електродів сенсора 3 та поверхні металевієї пластини 4, звернена до поверхні електродів сенсора повинні бути зачищені від бруду пилу та вологи. На поверхнях також має бути лаку або фарби. Також поверхня пластини 4, повинна бути ідеально плоскою, без вигинів, подряпин, ям тощо.

Методика випробувань. Випробування проводилося методом вимірювань мостом EUCOL 2836 LCR METER електричної ємності C_{12} між системою електродів 1 і 2 в процесі зміни відстані до заземленої поверхні за допомогою мікрометричної голівки стелу в діапазоні від 2,0 до 10,0 мм і зняттям відповідних показів з моста EUCOL 2836 LCR METER. Функціональна схема стелу для проведення випробувань наведена на рис. 7. Ємність C_{12} вимірювалась під час прямої і зворотної зміни відстані d з розрахунком середнього значення.

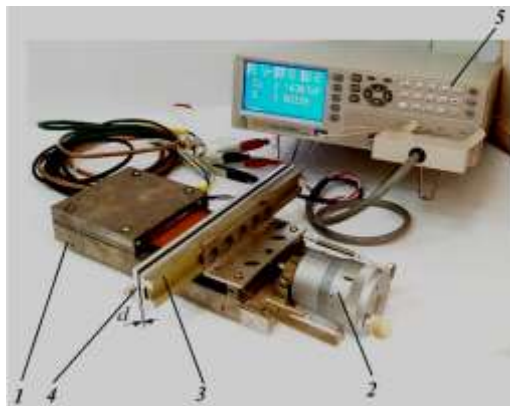


Рисунок 6 – Вимірювання інформативної електричної ємності сенсора

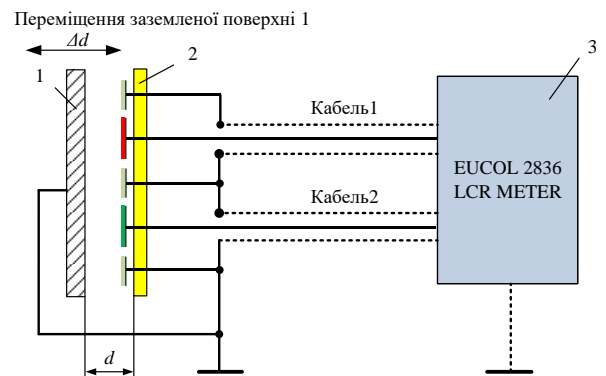


Рисунок 7 – Схема вимірювання інформативної електричної ємності сенсора

На рисунку 8 наведено графіки функцій $C_{12} = f(d)$ отриманих експериментальним шляхом (графік 1) і розрахованих теоретично (графік 2). Експериментальні значення відрізняються від розрахованих теоретично через додавання постійної складової, яка обумовлюється ємністю між системою електродів 1 і 2 через діелектричний проміжок 2 (рис.2).

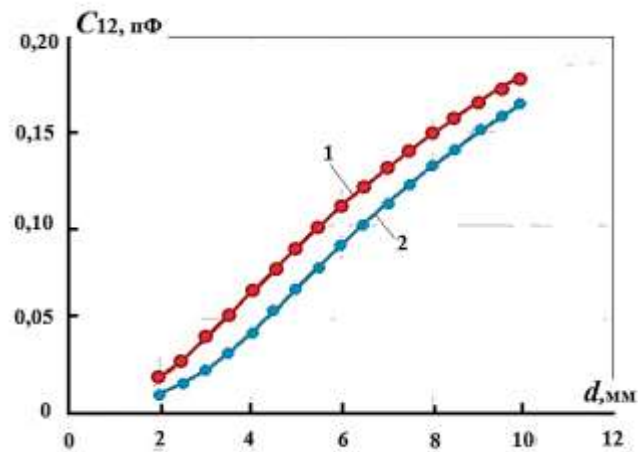


Рисунок 8 – Графіки залежності $C_{12} = f(d)$ отриманої:
1 – експериментально, 2 – теоретично.

Висновки. У статті представлено результати експериментального визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку між розточенням осердя статора та полюсами ротора в потужному гідрогенераторі, який забезпечує більшу точність вимірювання завдяки новій геометрії системи компланарних паралельних електродів. Запропонований сенсор використовує інноваційну геометрію компланарних паралельних електродів, що дозволяє суттєво підвищити точність вимірювань. Вдосконалена система сенсорів сприяє більш ефективному контролю стану гідрогенератора та підтримці його стабільної роботи, що є критично важливим в умовах підвищених вимог до надійності енергетичної інфраструктури. Дослідження підтвердило функціональну спроможність сенсора і вірність теоретичних розрахунків. Отримані результати підтверджують можливість застосування ємнісного сенсора з запропонованою системою паралельних компланарних електродів для вимірювання повітряного проміжку між статором та ротором в капсульному гідрогенераторі типу СГК 538/160-70М в діапазоні від 2 до 10 мм.

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 гідроакмулюючих 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).

Інформаційні джерела

1. Глебов І. А., Домбровський В. В., Дукштау А. А., Папер А. С., Пінський Г. Б., Школьник Є.В. Гідрогенератори. 1982. 368 с.
2. ISO 19283:2020 (E). Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 с.
3. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Норми випробування електрообладнання. М-во енергетики та захисту довкілля України. Офіц. вид. ПрАТ "НЕК "Укренерго". 238 с.
4. Overview of Typical Factors Affecting the Air Gap of a Hydrogenerator. [Online]. Available: https://library.vibrosystem.com/en/Application_Notes/AN006-a.pdf. Accessed at May 13.05.2024.
5. Xu B., Chen D., Zhang H., Li C., Zhou J. Shaft mis-alignment induced vibration of a hydraulic turbine generating system considering parametric uncertainties. Journal of Sound and Vibration. 2018. №435, Pp. 74-90. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.08.008.
6. Wu Q., Zhang L., Ma Z. A model establishment and numerical simulation of dynamic coupled hydraulic-mechanical-electric-structural system for hydropower station. Nonlinear Dynamics. 2017. № 87(1). Pp. 459-474. DOI:10.1007/s11071-016-3053-1.
7. Zhanga J., Zhanga L., Ma Z., Wanga X., Wuc Q., Fand Z. Coupled bending-torsional vibration analysis for rotor-bearing system with rub-impact of hydraulic generating set under both dynamic and

static eccentric electromagnetic excitation. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2021, № 147. Pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.chaos.2021.110960.

8. 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.

9. Air Gap monitoring (Rotor/Stator). VM™ Air Gap. [Online]. Available: https://www.vibrosystm.com/en/product/vm_air_gap. Accessed at May 13.05.2024.

10. 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 May 13.05.2024.

11. Iris Power AGTracII. [Online]. Available: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2016/11/Iris-Power-Air-Gap-Condition-Monitoring-AGTracII-Brochure.pdf>. Accessed at May 13.05.2024.

12. 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 May 13.05.2024.

13. 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>.

14. 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 НАНУ: Зб. наук. пр., 2016. Вип.43. С. 134-136.

¹Rassoskyi V., ²Zaitsev Ie., ²Levytskyi A.

¹ PJSC "Ukrhydroenergo"

²Institute of Electrodynamics of the National Academy Sciences of Ukraine

STUDY OF THE CAPACITIVE SENSOR OF THE AIR GAP IN THE HYDROGENERATOR WITH PARALLEL COPLANAR ELECTRODES

The paper describes the design, circuit and technological features of a capacitive sensor of the air gap (AG) between the bore of the stator core and the rotor poles in a capsule hydrogenerator, formed by a system of strip parallel coplanar electrodes. The system contains high-potential, low-potential and grounded electrodes. The change in electrical capacitance between the system of high-potential electrodes and low-potential electrode systems functionally depends on the change in the distance between the common plane of the sensor electrodes at the rotor poles, which is the value of the air gap. A method for experimentally determining the sensor conversion function is outlined. The equipment and measuring instruments used described. The research methodology for simulating changes in AG involves the use of a special device for parallel plane movement of a flat-grounded plate, which imitates the surface of a rotor pole in a machine. The plate moves along the device carriage relative to the common surface of the sensor electrodes, which fixed on the device. A micrometer head carries out the task of movement and its registration. Tabular and graphical data illustrating the experimentally determined transformation function obtained. A comparison of the experimental results with the theoretical ones confirmed the correctness of the proposed principles for constructing the sensor. The use of a sensor makes it possible to increase the accuracy of measuring AG in hydrogenerator, which will ultimately improve the assessment of the current technical condition of the machine.

Key words: hydrogenerator, air gap between the stator and rotor, capacitive sensor, experimental sample.