

**ЄМНІСНИЙ СЕНСОР З СИСТЕМОЮ ПАРАЛЕЛЬНИХ КОМПЛАНАРНИХ ЕЛЕКТРОДІВ  
ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ В ГІДРОГЕНЕРАТОРАХ**

А.С. Левицький<sup>1\*</sup>, докт.техн.наук, В.Л. Рассовський<sup>2</sup>, Є.О. Зайцев<sup>1\*\*</sup>, докт.техн.наук.

<sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: [levitskiyanatoliy@mail@gmail.com](mailto:levitskiyanatoliy@mail@gmail.com), [zaitsev@i.ua](mailto:zaitsev@i.ua).

<sup>2</sup>ПрАТ "Укргідроенерго",

Київська обл., м. Вишгород, 07300, Україна.

E-mail: [v.rassovskiy@uhe.gov.ua](mailto:v.rassovskiy@uhe.gov.ua).

У роботі запропоновано та досліджено ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору між розточенням осердя статора і полюсами ротора в потужному гідрогенераторі. Сенсор складається з системи рівних за шириною стрічкових паралельних компланарних високопотенціальних та низькопотенціальних електродів, між якими розміщуються заземлені електроди. Співвідношення між шириною високопотенціального, низькопотенціального та заземленого електродів вибираються в залежності від величини номінального зазору. Електроди сформовані на діелектричній підкладці, встановленій на розточенні осердя статора. Задля зменшення впливу крайових ефектів на коротких сторонах високопотенціальних електродів довжина низькопотенціальних електродів вибирається меншою, ніж довжина високопотенціальних електродів на величину, яка визначається номінальним зазором. Запропоновано, для зменшення похибки вимірювання, зумовленої впливом кривизни полюсів ротора, розмістити всі електроди за довжиною перпендикулярно твірній розточення осердя. Вимірюється електрична ємність між системою паралельно з'єднаних між собою високопотенціальних електродів і системою паралельно з'єднаних між собою низькопотенціальних електродів, яка функціонально залежить від величини повітряного зазору. Визначено аналітичні та графічні залежності для функції перетворення сенсора, призначеного для використання на капсульному гідрогенераторі типу СГК538/160-70М. Розраховано величину похибки, зумовленої кривизною полюсів ротора в цьому гідрогенераторі. Сенсор в порівнянні з аналогами має вищу точність вимірювання. Сенсор або система сенсорів можуть бути використані як окремий прилад, так і як складова частин систем моніторингу та діагностики. Бібл. 19, рис. 6.

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

**Вступ.** Повітряний зазор між ротором і статором є одним з найважливіших параметрів потужного гідрогенератора (ГГ) і в значній мірі визначає характеристики машини та її роботу в процесі експлуатації [1], а також істотно впливає і на ряд інших характеристик ГГ: на значення торцевих магнітних потоків і втрат, що викликаються ними в крайніх пакетах осердя та натискних плитах статора, на значення й розподіл втрат на поверхні полюсів ротора, а також на області допустимих режимів роботи генераторів [2].

У відповідності до чинних державних та міжнародних нормативних документів [3–5] повітряні зазори в ГГ є відносно невеликими в порівнянні з діаметрами розточення осердя статора та в діаметрально протилежних точках можуть відрізнятися один від одного не більше, ніж на  $\pm 20\%$ , якщо заводськими інструкціями не передбачено більш жорсткі норми.

Як відомо [6] повітряний зазор в гідрогенераторах може вимірюватися в статичному режимі під час монтажу на ГЕС або на зупиненій машині під час проведення капітальних ремонтів. Проте дані, отримані з застосуванням статичних вимірювань, не являються якісною основою для оцінки дійсної величини й нерівномірності повітряного зазору машини і, ясна річ, не можуть бути використані в системах моніторингу та діагностики задля визначення фактичного технічного стану машини. Це пов'язано, насамперед з тим, що в динаміці через набір обертів і роботу під навантаженням відбуваються процеси, які впливають на величину та форму зазору [7]. Це зумовлено дією відцентрових сил, викликаних нерівноваженістю обертювних мас ротора, тепловим і динамічним

прогином вала тощо [7–10]. Саме тому контроль в онлайн режимі (в динаміці) дає змогу одержати достовірні та повніші дані щодо відхилення повітряного зазору від їхніх нормованих значень. Отримані в онлайн режимі дані про значення зазору із використанням систем, запропонованих в [1, 11], дають змогу контролювати зміщення та бій окремих полюсів ротора, деформацію ободу ротора, годограф траєкторії руху центру ротора та інші критично важливі експлуатаційні параметри, які характеризують роботу ГГ.

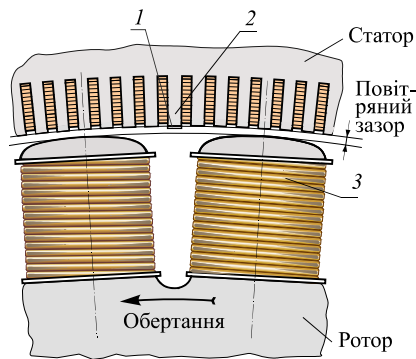


Рис. 1

Як первинне джерело даних задля вирішення завдання достовірного контролю повітряного зазору в гідрогенераторах на даний час найбільшого поширення набули автоматизовані вимірювачі на базі емнісних сенсорів, які виконано в формі пластини, що закріплюється на розточенні осердя статора. Електрична ємність сенсорів залежить від значення повітряного зазору, 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 – емнісний сенсор; 2 – зубець осердя статора; 3 – полюс ротора.

Ємнісним сенсорам зазору притаманні специфічні похибки. До них відносяться: похибки, зумовлені впливом крайових ефектів, характер зміни яких та їхні значення залежать від геометрії електродів; технологічні похибки виготовлення електродів та похибки від неточності встановлення сенсорів на машині; похибки від конструктивних параметрів елементів машини. Під час створення сенсорів зазору задля забезпечення точності вимірювання вплив зазначених похибок необхідно мінімізувати.

На сьогодні емнісні вимірювачі повітряного зазору розробляють і виготовляють відомі світові компанії VibroSystm (Канада) [12], Bently Nevada (США) [13], Iris Power (Канада, США) [14], Mikrotrend (Хорватія) [15], Meggitt SA (Швейцарія) [16], Brüel & Kjaer Vibro (Данія, Німеччина) [17]. Аналіз науково-технічних джерел показав, що зазначені компанії не публікують даних про геометрію електродів емнісних сенсорів і даних з оцінки впливу на функції перетворення геометричних параметрів гідрогенераторів, насамперед радіуса кривизни полюса ротора. В ІЕД НАН України було створено ряд емнісних сенсорів зазору в ГГ, для яких було проведено розрахунки похибок вимірювання, зумовлених кривизною полюса ротора [6]. Встановлено, що зазначена похибка зростає зі збільшенням поперечного розміру сенсора (перпендикулярному твірній розточення осердя) і зменшенням радіусу полюсу ротора. За мінімальних зазорів відносна похибка вимірювання може досягати десятих долей процента.

**Метою даної роботи** є визначення характеристик ємнісного сенсора зазору в гідрогенераторах, в якому мінімізовано похибку вимірювання, зумовлену кривизною полюсів ротора.

У роботах [1, 6] розглядається емнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору між поверхнею розточення осердя статора і полюсом ротора в ГГ, що містить стрічкові високопотенціальний та низькопотенціальний електроди, довгі сторони яких паралельні між собою та твірній розточення осердя статора. За такої конструкції похибка, зумовлена кривизною полюсів ротора, може досягати також десятих долей процента. Задля зменшення похибки було розроблено конструкцію сенсора, що являє собою діелектричну пластину, на якій в одній площині розміщено систему електродів ємнісного сенсора (рис. 2). До складу сенсора входять стрічкові, паралельні між собою і перпендикулярні твірній розточення осердя статора високопотенціальні електроди 1, низькопотенціальні електроди 2 та додатковий заземлений електрод 3, який розташований навколо високопотенціальних і низькопотенціальних електродів та між ними. Електроди 1, 2 і 3

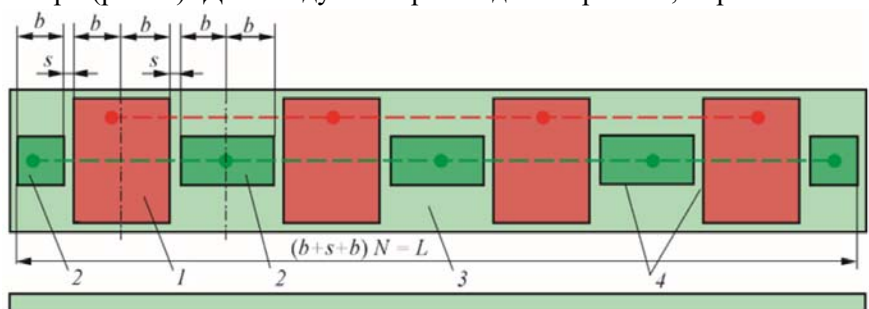


Рис. 2

відокремлені один від одного діелектричними проміжками 4.

Всі високопотенціальні електроди 1 та низько-потенціальні електроди 2 з'єднані між собою таким чином, що утворюють систему електродів нового ємнісного сенсора.

Розміри електродів:  $l_1, l_2$  – довжина високопотенціального та низькопотенціального електродів 1 і 2 відповідно;  $2b$  – ширина високопотенціального електрода 1;  $b$  – ширина низькопотенціального електрода 2;  $s$  – ширина додаткового електрода 3 між електродами 1 і 2;  $h$  – ширина діелектричного проміжку 4 (на рис. 1 не показано).

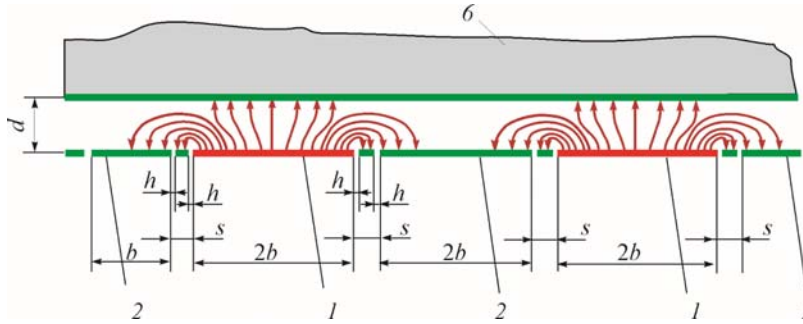


Рис. 3

Довжину  $l_1$  електрода 1 вибрано з умови  $l_1 = l_2 + 2l_3$ ,  $l_3 \geq d_0$  (рис. 1). Якщо проміжки  $h$  є нескінченно малими та електричне поле між електродами 1 і 2 в кожному перетині перпендикулярно їхній довжині (рис. 3), то це поле є двовимірним і має однакову форму. В такому разі значно зменшується вплив крайових ефектів [18] на

сторонах  $b$  електрода 2.

Для зменшення нелінійності функції перетворення  $C_{12\Sigma} = f(d)$  ширина  $s$  частини додаткового електрода поміж високопотенціального та низькопотенціального вибрана із умови  $b/s \geq 6$ ,  $d_{\max}/s \leq 10$  ( $d_{\max}$  – максимальний зазор в гідрогенераторі) [18].

Визначимо ємність  $C_{12}$  одного елементарного сенсора в залежності від зазору та геометричних розмірів. Для цього використаємо результати досліджень [18, 19] з допущенням, що радіус полюса ротора є нескінченно великим, а товщина провідного шару електродів сенсора – нескінченно мала

$$C_{12} = l_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left( \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – діелектрична проникність вакууму;  $\varepsilon_r = 1,00056$  – відносна діелектрична проникність повітря;  $b$  – ширина високопотенціального та низькопотенціального електродів;  $s$  – відстань між електродами 1 і електродами 2;  $l_2$  – довжина низькопотенціального електрода 2;  $d$  – зазор між загальною площиною електродів 1, 2, 3 і полюсом ротора.

З паралельного з'єднання  $N$  елементарних сенсорів загальна ємність  $C_{12\Sigma}$  сенсора складе

$$C_{12\Sigma} = N \cdot l_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left( \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (2)$$

З аналізу формули (2) видно, що коли: а)  $d \rightarrow 0$ , то  $C_{12\Sigma}|_{d=0} = 0$ ; б) ширина  $s$  охоронного заземленого електрода між електродами 1 і 2 є нескінченно малою ( $s = 0$ ), то  $C_{12\Sigma}|_{d=0} = 0$ ; в) зазор  $d$  між площиною електродів 1 і 2 є нескінченно великим ( $d \rightarrow \infty$ ), то

$$C_{12\Sigma}|_{d \rightarrow \infty} = N l_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{(s+b)^2}{s(s+2b)}.$$

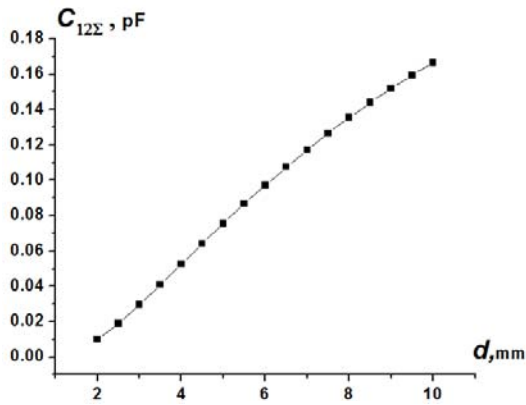


Рис. 4

Визначимо функцію перетворення сенсора зазору, що призначений для використання на капсульному гідрогенераторі типу СГК 538/160-70М, в якому повітряний зазор  $d$  між статором і ротором змінюється в діапазоні від 2 до 10 мм. Використовуючи результати [18, 19] встановимо, що оптимальними розмірами електродів сенсора будуть:  $l_2=10$  мм;  $b=12$  мм;  $s=2$  мм. На рис. 4 наведено графік функції перетворення  $C_{12\Sigma} = f(d)$ .

Формула (1) для функції перетворення не враховує того, що в реальних умовах зазор в машині визначається не до плоскої поверхні, а до поверхні полюса, що має кривизну. Визначимо похибку, зумовлену цією обставиною. Для цього створимо розрахункову схему, на якій зображено окремий елементарний сенсор (рис. 5), що є складовою частиною всього сенсора. Похибка від кривизни полюса ротора окремого сенсора буде такою ж, як і похибка системи паралельних сенсорів.

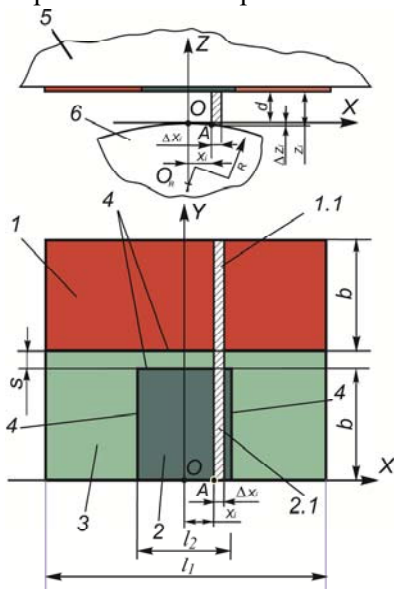


Рис. 5

Введемо систему координат  $XYZ$  і виділимо в площині електродів площадку нескінченно малої ширини  $\Delta x_i$ , яка перебуває на відстані  $x_i = OA$  від осі  $Y$ . На елементарній площадці утворюються два компланарні електроди 1.1 і 1.2. Ємність  $\Delta C_{12i}$  між ними в залежності від їхніх розмірів і координати  $z_i$  визначиться як

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

З урахуванням геометричних співвідношень між радіусом кривизни полюса  $R$ , відстанню  $x_i$  і зазору  $d$  координата  $z_i$  складе

$$z_i = d + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}. \quad (4)$$

З урахуванням (4) отримаємо  $\Delta z_i = R - \sqrt{R^2 - x_i^2}$ .

Загальна ємність окремого сенсора з урахуванням  $R$  визначиться за формулою

$$C_{12Cur} = \sum_{i=0}^{\infty} \Delta C_{12i} = 2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \int_0^{l_2/2} \ln \frac{\left( \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d+R-\sqrt{R^2-x^2})} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d+R-\sqrt{R^2-x^2})} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d+R-\sqrt{R^2-x^2})} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d+R-\sqrt{R^2-x^2})}} dx. \quad (5)$$

Похибка сенсора, зумовлена кривизною полюсів ротора, з урахуванням (1) і (5) дорівнює

$$\delta_{Cur} = \left( 1 - \frac{C_{12Cur}}{C_{12}} \right) \cdot 100\%. \quad (6)$$

Графік залежності  $\delta_{Cur} = f(d)$  показано на рис. 6.

Як видно з цього графіка, застосування запропонованого ємнісного сенсора з системою паралельних компланарних електродів зменшує похибку вимірювання, зумовлену кривизною полюсів ротора ГГ, приблизно в три рази в порівнянні з аналогічною похибкою подібних сенсорів з такими ж габаритними розмірами [6].

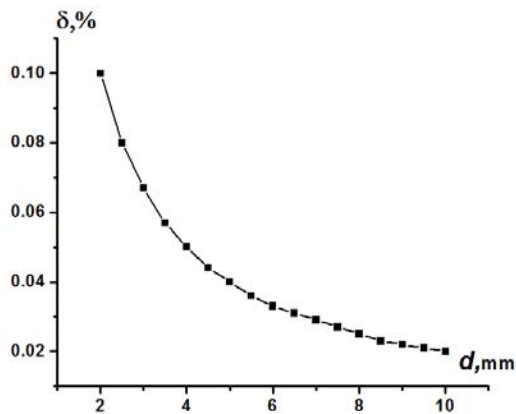


Рис. 6

для вимірювання повітряного зазору в гідрогенераторах різних типів з урахуванням їхніх конструктивних особливостей.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці» (шифр «Параметр-Д»), КПКВК6541030 та в рамках іменної стипендії Верховної Ради України для молодих учених – докторів наук за 2022 рік (Постанова Верховної Ради України від 01.12.2022 № 2791-IX).

## A CAPACITIVE SENSOR WITH PARALLEL COMPLANARE ELECTRODES SYSTEM FOR MEASUREMENT OF AIR GAP IN HYDROGENERATORS

A.S. Levitsky<sup>1</sup>, V.L. Rassovsky<sup>2</sup>, Ie.O. Zaitsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Peremohy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [levitskiyanatoliy@mail@gmail.com](mailto:levitskiyanatoliy@mail@gmail.com), [zaitsev@i.ua](mailto:zaitsev@i.ua).

<sup>2</sup> PJSC "Ukrhydroenergo",

Kyiv region, Vyshgorod, 07300, Ukraine.

E-mail: [v.rassovsky@uhe.gov.ua](mailto:v.rassovsky@uhe.gov.ua).

*A capacitive sensor for measuring the air gap between the boring of the stator core and the poles of the rotor in a powerful hydrogenerator is proposed and investigated. The sensor consists of a system of equal in width tape parallel coplanar high-potential and low-potential electrodes, between which grounded electrodes are placed. The ratios between the width of the high-potential, low-potential and grounded electrodes are selected depending on the size of the nominal gap. The electrodes are formed on a dielectric substrate mounted on the boring of the stator core. To reduce the effect of edge effects on the short sides of high-potential electrodes, the length of the low-potential electrodes is chosen to be smaller than the length of the high-potential electrodes by a value determined by the nominal gap. It is proposed to place all electrodes along the length perpendicular to the boring core generatrix to reduce the measurement error due to the influence of the rotor pole curvature. The electrical capacitance between the system of high-potential electrodes connected in parallel and the system of low-potential electrodes connected in parallel, which functionally depends on the size of the air gap, is measured. Analytical and graphical dependences for the sensor conversion function intended for use on a SGK538 / 160-70M bulb hydrogenerator have been determined. The value of the error caused by the curvature of the rotor poles in this hydrogen generator was calculated. The sensor in comparison with analogs has higher accuracy of measurement. The sensor or sensor system can be used as a stand-alone device or as part of monitoring and diagnostic systems. References 19, figures 6.*

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

1. Zaitsev Ie., Levytskyi A. Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. In: Clean Generators – Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators. IntechOpen, 2020. Pp. 25-42. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.77988>.

2. Glebov I.A., Dombrovsky V.V., Dukshtau A.A., Paper A.S., Pinsky G.B., Shkolnik E.V. Hydrogenerators. Moskwa: Energoizdat, 1982. 368 p. (Rus)
3. Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units. ISO 19283:2020 (E). ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 p.
4. Norms of electrical equipment testing. SOU-N EE 20.302:2020. Ministry of Energy and Environmental Protection of Ukraine. officer kind. PJSC NEC Ukrenergo. 238 p. URL: <https://docs.dtkr.ua/download/pdf/1225.943.1> (accessed date 13.07.2022). (Ukr)
5. Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants. ISO 20816-5:2018. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2018. 53 p.
6. 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)
7. Overview of Typical Factors Affecting the Air Gap of a Hydrogenerator. URL: [https://library.vibrosystem.com/en/Application\\_Notes/AN006-a.pdf](https://library.vibrosystem.com/en/Application_Notes/AN006-a.pdf) (accessed at 13.07.2022).
8. 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. No 435. Pp. 74-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.008>.
9. 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. No 87(1). Pp. 459-474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11071-016-3053-1>.
10. 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. No 147. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110960>.
11. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Sydorchuk V.E. Air gap control system for hydrogenerators. *Devices and Methods of Measurements*. 2017. No 8(2). Pp.122-130. DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-2-122-130>.
12. Air Gap monitoring (Rotor/Stator). VM<sup>TM</sup> Air Gap. URL: [https://www.vibrosystem.com/en/product/vm\\_air\\_gap/](https://www.vibrosystem.com/en/product/vm_air_gap/) (accessed at 13.07.2022).
13. 4000 Series Air Gap Sensor System. URL: <https://dam.bakerhughesds.com/m/4dfdaa01abf81f67/original/4000-Series-Air-Gap-Sensor-System-Datasheet-167885-pdf.pdf> (accessed at 13.07.2022).
14. Iris Power Capacitive Air Gap Sensor. URL: <https://www.veski.hr/brochures/Iris%20Power%20CGS%20Brochure%20Capacitive%20Gap%20Sensor.pdf> (accessed at 13.07.2022).
15. Mikrotrend. URL: <https://www.mikrotrend.com/ags-air-gap-sensor.htm> (accessed at 13.07.2022).
16. Air-gap measuring system LS 120 transducer and ILS 730 signal conditioner. URL: [https://tsisl.es/tsi/wp-content/uploads/2015/07/DS\\_LS120\\_ILS730-en.pdf](https://tsisl.es/tsi/wp-content/uploads/2015/07/DS_LS120_ILS730-en.pdf) (accessed at 13.07.2022).
17. Air Gap Sensor EQ 2431-A. URL: <https://www.bkvibro.com/product/eq2431-a2-air-gap-sensors/> (accessed at 13.07.2022).
18. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Characteristic of capacitive sensor for the air gap control system in the hydrogenerator. Proc. 2017 IEEE First Ukraine Conference *On Electrical And Computer Engineering (UKRCON)*. Kyiv, Ukraine, May 29 – June 2, 2017. Pp. 390-394. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100516>.
19. Gorbova G.M., Gorbov M. M., Meijer G. C. M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor. Proc. XVII *IMECO World Congress*. Dubrovnic, Croatia, June 22-27, 2003. TC15. Pp. 1965-1968.

Надійшла 11.01.2023  
Остаточний варіант 25.02.2023