

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-14>

УДК 621

БЕРЕЗНИЧЕНКО Вікторія

Інститут електродинаміки НАН України

<https://orcid.org/0000-0002-9961-1703>

vika.bereznichenko@i.ua

ЗАКУСИЛО Сергій

Інститут електродинаміки НАН України

<https://orcid.org/0000-0002-9193-8920>

sergy_zakusilo@i.ua

РАССОВСЬКИЙ Вадим

ПрАТ «Укргідроенерго»

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

v.rassovsky@uhe.gov.ua

ТЕОРЕТИЧНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРУ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ З СИСТЕМОЮ КОМПЛАНАРНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Важливим аспектом забезпечення надійності роботи гідроагрегатів електростанцій є контроль їх технічного стану. Під час експлуатації в елементах конструкції потужних генераторів відбувається ряд фізико-хімічних, термічних і механічних процесів, які з часом призводять до початку розвитку дефектів обертових і не обертових елементів конструкції машини. Одним із основних параметрів гідрогенераторів є повітряний зазор між ротором і статором.

Представлено результати визначення функція перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку з системою компланарних електродів на основі експериментальних, аналітичних та імітаційних розрахунків. Показано, що використання такої системи електродів дозволяє зменшити вплив похибок конструктивними параметрами вузла контролю на результат вимірювання. У результаті проведених досліджень було встановлено, що запропонований ємнісний сенсор є ефективним і може забезпечити точне вимірювання повітряного проміжку між ротором і статором гідрогенератора. Використання запропонованого сенсора або групи сенсорів у системах керування та діагностики гідроагрегатів електростанцій забезпечить безперебійну роботу електрообладнання ОЕС України.

Ключові слова: гідрогенератор, повітряний проміжок, ємнісний сенсор, моніторинг стану.

BEREZNYCHENKO Viktoriia, ZAKUSILO Sergy
The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
RASOVSKYI Vadim
PJSC "Ukrhydroenergo"

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF CAPACITIVE AIR GAP SENSOR FOR POWERFUL HYDRO GENERATORS CONTROL SYSTEMS WITH COPLANAR ELECTRODE SYSTEM

Determining the actual technical condition of the energy equipment of power plants, especially such a complex one as a hydrogenerator, requires constant monitoring of its technical condition. To ensure such control, monitoring and diagnostic systems are used, which allow determining the presence and development of defects by changing the control and diagnostic parameters of the generator. The reason for changing the parameters of the generator is the influence of electrical, chemical, thermomechanical, hydraulic and other processes on its structural units, which over time lead to changes in the physical and chemical properties of materials and, as a result, to the appearance of defects in rotating and non-rotating elements of the machine design. The complexity and terms of repair, the possibility of further operation of the machine or its individual components depends on the correct definition of the source of the process that led to the appearance of the defect, its type, location and degree of development.

An important aspect of ensuring the reliability of the operation of hydraulic units of power plants there is control of their technical condition.

During operation lot of physico-chemical, thermal and mechanical processes take place in the structural elements of powerful generators, which eventually lead to the development of defects in rotating and non-rotating machine structural elements. One of the main parameters of hydro generators is the air gap between the rotor and the stator.

The results of determining the conversion function of the capacitive sensor of the air gap with a system of coplanar electrodes based on experimental, analytical and simulation calculations presented. Showing that the use of such a system of electrodes allows reducing the impact of errors in the design parameters of the control unit on the measurement result. The conducted studies showed that the proposed capacitive sensor is effective and can provide accurate measurement of the air gap between the rotor and the stator of the hydrogen generator. The use of the proposed sensor or a group of sensors in the control and diagnostic systems of hydroelectric units of power plants will ensure uninterrupted operation of the electrical equipment of the IPS of Ukraine.

Keywords: hydrogenerator, air gap, capacitive sensor, condition monitoring.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Визначення фактичного технічного стану енергетичного устаткування електростанцій, особливо такого складного, як гідрогенератор, потребує постійного контролю його технічного стану [1]. Для забезпечення такого контролю використовуються системи моніторингу та діагностики, які дозволяють визначити наявність та розвиток дефектів за зміною контрольних-діагностичних параметрів генератора. Причиною зміни параметрів генератора є вплив електричних, хімічних, термомеханічних, гідравлічних та інших процесів на його конструктивні вузли, які з плином часу призводять до зміни фізико-хімічних властивостей матеріалів і як наслідок до появи дефектів в обертових та не обертових елементах конструкції машини. Від правильного визначення джерела процесу, що призвів до появи дефекту, виду, місця і ступеня його розвитку залежить складність і терміни ремонту, можливість подальшої експлуатації машини або її окремих вузлів.

Визначення джерела дефекту та процесів, які призвели до його появи через складну природу вузлів гідроагрегатів вимагає застосування спеціалізованих засобів та методів вимірювання на базі гамми спеціалізованих сенсорів з відповідними засобами попередньої обробки отриманої контрольної-діагностичної інформації. Системи моніторингу фактичного технічного стану обладнання багатьох ГЕС часто не відповідають сучасним вимогам, які виникають у результаті зміни умов експлуатації гідроагрегатів, проведення їх ремонтів та модернізації, а також оновлення вимог, щодо проведення обслуговування гідроагрегатів. Так у квітні 2020 року міжнародна організація зі стандартизації (ISO) розробила та прийняла стандарт ISO 19283:2020 “Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units” (Моніторинг та діагностика стану машин - гідроагрегати), що є уточнюючим стандартом до цілого ряду діючих міжнародних та національних стандартів, які стосуються загальних рекомендацій щодо обслуговування машин за технічним станом[1]. Стандарт надає вичерпний опис тестових процедур, які дозволяють забезпечити комплексний підхід до діагностики стану гідрогенераторів з використанням даних від систем моніторингу та діагностики складових конструктивних елементів.

До основних тестових процедур, які виконуються в різних режимах роботи гідрогенератора відноситься контроль повітряного проміжку між його статором та ротором. Адже в повітряному проміжку механічна енергія отримана за допомогою води перетворюється на електричну під час обертового руху ротора в середині нерухомого статора. Під час здійснення цього перетворення гідрогенератор перебуває під впливом різних сил (електромагнітні, термомеханічні, відцентрові та інші), які призводять до появи зміщень та коливань елементів конструктивних вузлів гідрогенератора, що у свою чергу з часом призводить до появи асиметрії повітряного проміжку між ротором та статором. Конструктивною особливістю повітряного зазору в гідрогенераторі є його відносно малий розмір порівняно з діаметром отвору статора. В таких умовах особливо важко досягти стабільних розмірів і рівномірності повітряного проміжку, особливо під час роботи гідрогенератора. Величина нерівномірності розподілу повітряного проміжку значною мірою визначає фактичні характеристики гідрогенератора та його поведінку під час роботи, а також істотно впливає на ряд інших характеристик машини [2], можливість їхньої подальшої експлуатації, коефіцієнту готовності, тощо.

Найпоширенішим типом сенсора, який набув застосування в системах контролю повітряного проміжку є ємнісний, який виконується у вигляді пластини, що встановлюється на розточення осердя статора. Це пов'язано з тим, що ємнісні сенсорні мають ряд переваг перед іншими типами сенсорів, а саме:

- достатньо високу точність і роздільну здатність;
- нечутливість до впливу потужних магнітних полів внутрішнього та зовнішнього середовища гідрогенераторів [3, 4];
- простоту конструкції електродів (чутливих елементів) і технології виготовлення, що дозволяє забезпечити низьку собівартість [4];
- збереженням характеристик сенсора в широкому діапазоні робочих температур, які визначаються лише стійкістю матеріалів, що застосовуються;
- різноманітністю форм і розмірів ємнісних сенсорів, що дозволяють використовувати їх в різних контрольних-діагностичних точках електроенергетичного обладнання;
- простотою розрахунків геометричних характеристик чутливого елементу сенсора, що забезпечує повторюваність характеристик, відсутність операцій тарування, а також взаємозамінність сенсорів.

При цьому ємнісним сенсорам повітряного проміжку притаманні недоліки пов'язані із специфічними похибками зумовленими впливом крайових ефектів, характер зміни і величина яких залежать від геометрії електродів [5], технологічних похибок виготовлення електродів[6], неточності встановлення сенсорів на машині, впливу геометрії радіусу полюсів на функцію перетворення сенсорів та інші. Для забезпечення необхідної точності вимірювання повітряного проміжку [1, 2, 7] застосовують конструктивні методи мінімізації вказаних похибок ще на етапі їх проектування. В [5] досліджено вплив кривизни полюса ротора на функцію перетворення плоскопаралельного сенсора повітряного проміжку з охоронним електродом та встановлено, що похибка збільшується із збільшенням поперечного розміру сенсора (перпендикулярному твірній розточення осердя) і зменшенням радіусу полюсу ротора. При цьому за

мінімальних значень повітряного проміжку відносна похибка вимірювання цим сенсором може досягати десятих долей відсотка.

Аналітичний огляд відомих літературних джерел присвячених дослідженню ємнісних сенсорів повітряного зазору [8-14] та відкритих матеріалів світових компаній, які займаються їх розробкою та впровадженням [15-23], показав відсутність досліджень використання з ємнісних сенсорів з системою компланарних електродів та дослідження їх функцій перетворення. Для зменшення впливу зазначених факторів на результат контролю повітряного проміжку в [23] було запропоновано використання ємнісних сенсорів з системою компланарних електродів, але не проведено досліджень із визначення функції перетворення в залежності від значення повітряного проміжку із використанням імітаційних чи фізичних моделей.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Тому метою даної статті є визначення характеристик ємнісного сенсора повітряного проміжку з системою компланарних електродів із використанням імітаційних та фізичних моделей.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Викладення основного матеріалу. На рис. 1 наведено ємний сенсор повітряного проміжку з системою компланарних електродів, виконаними у вигляді паралельних компланарних смужкових електродів. Зменшення впливу похибки на результат визначення величини повітряного проміжку між ротором і статором, в порівнянні з іншими ємнісними сенсорами повітряного проміжку [24, 25], досягається завдяки застосуванню системи компланарних електродів, розміщених на діелектричній пластині в одній площині. Розрахункова схема сенсора наведена на рис.1. 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. Додатковий електрод 3 розташований навколо високопотенціальних і низькопотенціальних електродів та між ними. Електроди 1, 2 і 3 відокремлені один від одного діелектричними проміжками 4.

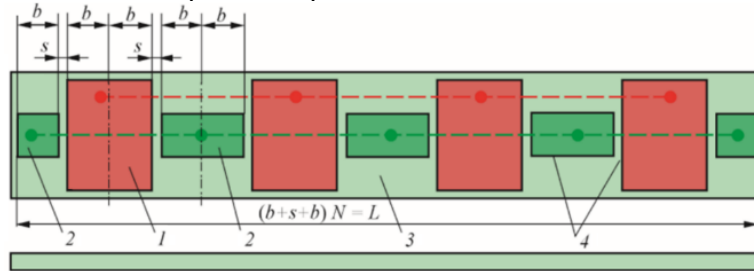


Рис. 1. Розрахункова схема ємнісного сенсора

Всі високопотенціальні електроди 1 та низькопотенціальні електроди 2 з'єднані між собою, таким чином, що утворюють систему електродів ємнісного сенсора. Електрична ємність системи електродів C_c між системою електродів 1 і системою електродів 2 має залежність від відстані до заземленої поверхні ротора, яка визначається як [5]:

$$C_c = N \cdot l_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (1)$$

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

Для визначення функції перетворення сенсора повітряного проміжку скористаємося результатами [5, 6, 24, 25], де встановлено, що оптимальними розмірами електродів сенсора будуть: $l_2 = 10$ мм; $b = 12$ мм; $s = 2$ мм. З урахуванням зміни повітряного проміжку від 2 до 10 мм, який є характерним для капсульних гідрогенераторів, наприклад типу СГК 538/160-70М. Отримана функція перетворення приведена на рис. 7.

Формула (1) для розрахунку функції перетворення сенсора повітряного проміжку між ротором та статором гідрогенератора отримана із використанням методу конформних перетворень безпосереднього розрахунку напруженості електричного поля. Цей розрахунок базується на спрощених конфігураціях та не враховує вплив на функцію перетворення паразитних ємностей та особливості конструкції вузла контролю. Враховуючі складність та обмежених можливостей аналітичних розрахунків для реальних конструкцій ємнісних сенсорів повітряного проміжку з урахуванням особливостей вузла контролю доцільним є використання методів комп'ютерного моделювання. Аналітичний огляд методів і засобів мультифізичного моделювання дозволив визначити, що для вирішення електростатичних задач найкраще підходить програмне забезпечення Comsol Multiphysics на основі методу скінченних елементів, яке забезпечує можливість моделювання та дослідження областей будь-якої форми та властивостей.

Загальний вигляд моделі виготовленого за запропонованим способом ємнісного сенсора у вигляді двосторонньої друкованої плати наведено на рис. 2, де а) – сторона робочих електродів сенсора, а б) – сторона екранного електрода і під'єднань. Використовуючи розроблену імітаційну модель методом скінченних елементів у програмному середовищі моделювання COMSOL Multiphysics 5.4, було проведено дослідження розподілу електричного потенціалу сенсора (рис.3), розподілу ліній електричного поля між системою електродів сенсора (рис.4) та функції перетворення в залежності від значення зміни повітряного проміжку між статором та ротором (рис.7).

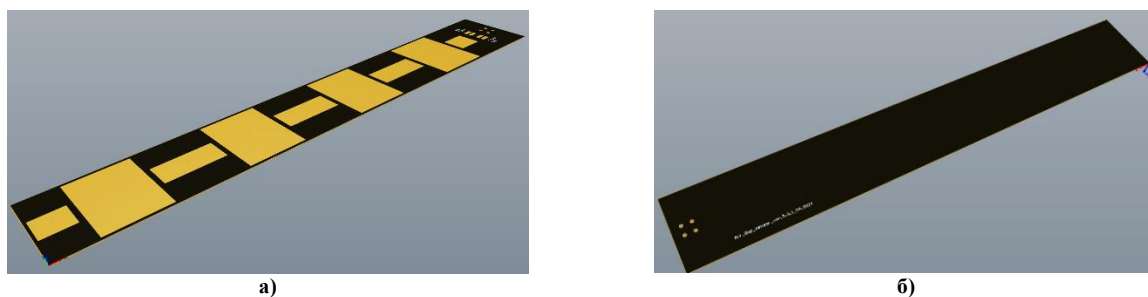


Рис.2. Модель ємнісного сенсора: а) сторона А, б) сторона Б

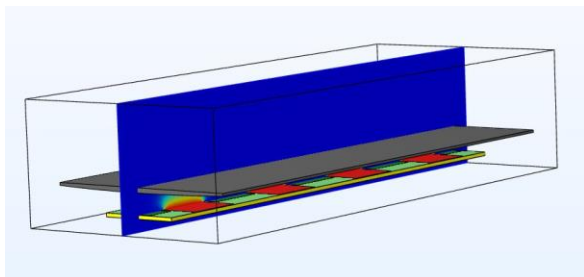


Рис.3 Розподіл електричного потенціалу між електродами сенсора

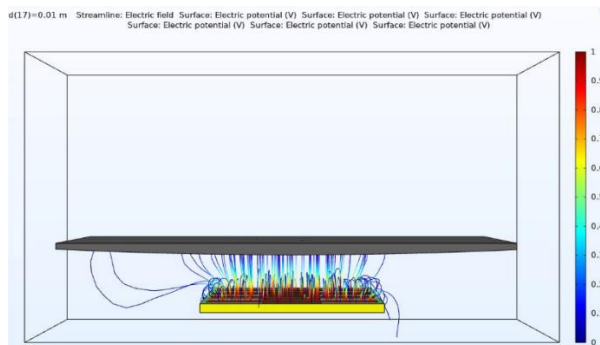


Рис.4 Розподіл ліній електричного поля між системою електродів сенсора

Для перевірки підтвердження адекватності отриманих результатів досліджень, отриманих за допомогою аналітичних розрахунків та засобів комп'ютерного моделювання та прийнятої методики розрахунку, в Інституті електродинаміки НАН України розроблено та створено макетний зразок ємнісного сенсора повітряного проміжку фотографію, якого показано на рис. 5. Випробування розробленого сенсора повітряного проміжку проводили на стенді (рис. 6), в якому використано вимірювальний міст EUCOL 2836 LCR METER з точністю 0,05%. Під час проведення випробувань визначали електричну ємність C_e між поверхнею електродів (чутливих елементів 4) та металевою поверхнею під час покрокової зміни зазору d за допомогою мікрометричної головки 2 в діапазоні від 1 до 12 мм. В результаті проведеного експериментального дослідження було отримано 23 базові точки для розрахунку експериментальної функціональної залежності значення ємності від значення повітряного проміжку d з компенсацією початкової ємності $C=3,14417$ пФ. Результати експериментальних досліджень представлено на рис. 7.

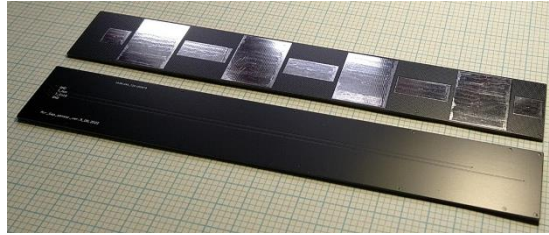


Рис.5 Експериментальний зразок ємнісного сенсора повітряного проміжку між статором і ротором

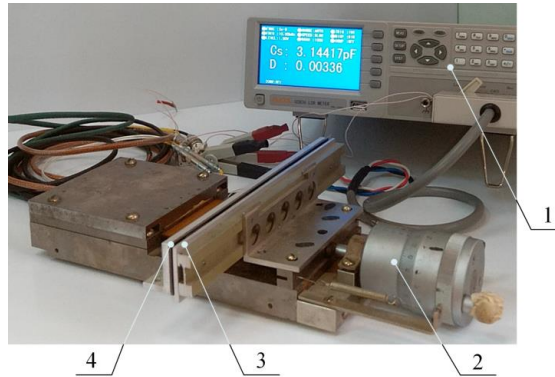


Рис. 6 Випробувальний стенд: 1 - вимірювальний міст; 2 - мікрометр; 3 - заземлена поверхня поверхні полюсу; 4 - ємнісний сенсор.

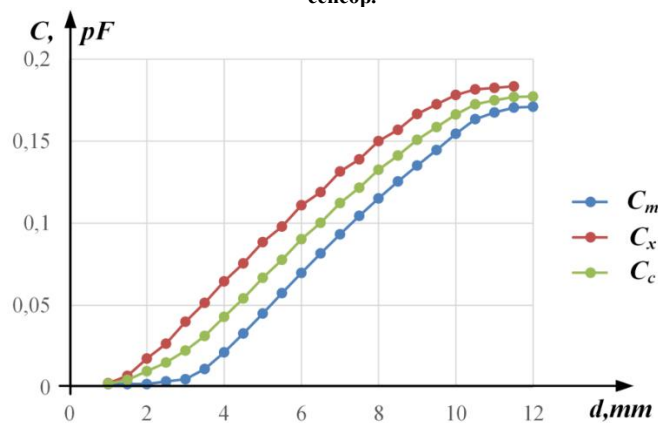


Рис. 7 Функції перетворення отримані за результатами: C_c – аналітичних розрахунків; C_m – моделювання; C_x – експериментальних досліджень.

Отримані результати підтверджують працездатність ємнісного сенсора повітряного проміжку та адекватність обраних методів. Відмінності між результатами експериментальних, аналітичних та імітаційних розрахунків зумовлені додатковою ємністю фольгованого склотекстоліту та ємністю ліній з'єднувальних каналів. Як показали дослідження значення цих ємностей мають адитивний характер, а їхні значення наближаються до певної константи і можуть бути компенсовані під час проведення процедури попереднього калібрування сенсора повітряного проміжку під час його встановлення на розточенні статора використовуючи калібровані засоби. Виявлення точної функціональної залежності кожного складника додаткової ємності від зміни проміжку d потребують проведення додаткових досліджень методами комп'ютерного моделювання, які дозволяють виключити вплив інших складників на результат дослідження інформативної складової ємності сенсора.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У статті наведено результати визначення характеристик ємнісного сенсора повітряного проміжку з системою компланарних електродів методами аналітичних розрахунків, комп'ютерного моделювання та досліджень експериментального зразка. Наведено результати порівняння отриманих результатів. Встановлено, що розбіжність між результатами має адитивний характер та може бути врахована під час калібрування сенсора. Різниця в результатах є мінімальною і дозволяє в подальшому використовувати системи моделювання для розробки оптимальних структур сенсорів повітряного проміжку в електрогенераторах. Проведені експериментально-теоретичні дослідження дозволили отримати

функціональні залежності для сенсора повітряного проміжку між статором та ротором гідрогенератора та можуть бути використані під час проектування систем автоматизованого контролю повітряного проміжку в гідрогенераторах та розробці програмного забезпечення вторинних вимірювальних перетворювачів для цих сенсорів.

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).

Література

1. ISO 19283:2020 Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units. ISO copyright. Office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 p.

2. Левицький А.С., Федоренко Г. М., Грубой О. П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.

3. Zaitsev I., Berezhnychenko V., Bajaj M., Taha I.B.M., Belkhier Y., Titko V., Kamel S. Calculation of capacitive-based sensors of rotating shaft vibration for fault diagnostic systems of powerful generators. Sensors. 2022. vol. 22(1634). 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041634>.

4. Study influence industrial frequency magnetic field on capacitive pressing sensor for large turbogenerator core clamping system/ Zaitsev Ie., Levytskyi A., Kromplyas B., Panchyk M., Berezhnychenko V. In Proc. of the 2019 IEEE Ukraine International Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON-2019), 2 – 6 Jule, 2019 Lviv, Ukraine. P. 566–569. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879949>.

5. Левицький А.С., Рассовский В.Л., Зайцев Є.О. Новий ємнісний сенсор з системою паралельних компланарних електродів для вимірювання повітряного зазору в гідрогенераторах. Технічна електродинаміка. 2023. №3. С. 80-85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.080>.

6. Zaitsev I.O., Levytskyi A., Berezhnychenko V. Analysis of the technological production defects influence on response function of shaft run-out sensor for generator fault diagnosis system. Ukraine International conference on electrical and computer engineering (UKRCON-2021): Proc. of the International conference. 26 – 28 August, 2019 Lviv, Ukraine. P. 435–438. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575886>.

7. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Hybrid capacitive sensor for hydro- and turbo generator monitoring system. In Proc. of the International conference on modern electrical and energy system (MEES-17) November 15 – 17, 2017 Kremenchuk, Ukraine. 2017. P.288-291. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248913>.

8. Capacitive and inductive sensors for diagnosing air-gap anomalies in synchronous generators / Caetano R.E., Chabu I.E., Stolfi G., Santos J.C., Junior S.N., Gomes C.E., Paiva R.D., Nabeta S.I., Micerino F.J. IEEE IEMDC.2015. P.637-641.

9. Chen T. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multi-layered dielectric structures. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. Vol. 17, №4. P.1307–1318. DOI: [10.1109/TDEI.2010.5539703](https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5539703).

10. Gorbova G. M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor. World Congress : Proceeding XVII IMECO 22–27 June 2003 Dubrovnic, Croatia, 2003. P.1965–1968.

11. Heerens W.C. Multi-terminal capacitor sensors. Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1982. №. 15. P. 137–141.

12. Mamishev A.V. Interdigital dielectrometry sensor design and parameter estimation algorithms for non-destructive materials evaluation. Cambridge: MIT. 1999. 709 p.

13. Aswani G., Maurya O.P., Mahboob R., Khan A.U., Islam T. Design and fabrication of nondestructive capacitive sensors for the moisture measurement in chickpeas and mustard seeds. Sustainability. 2024, №16(5), ID paper 1847. <https://doi.org/10.3390/su16051847>.

14. Li X. B., Larson S. D., Zyuzin A. S., Mamishev A. V. Design principles for multichannel fringing electric field sensors, IEEE Sensors Journal, vol. 6, no. 2, pp. 434-440, DOI: [10.1109/JSEN.2006.870161](https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.870161).

15. EES EAEC. World energy - Installed capacity of HPPs, 2023. [Online]. Available: <https://www.eeseaec.org/ustanovlennaa-mosnost-ges>. Accessed on: May 19, 2023.

16. Complete Monitoring Solutions. URL: <https://www.vibrosystm.com/en/industry/hydro/info> (access date 03/18/2021).

17. Junior G.C.B., Machado R.D., Neto A.C., Martini M.F. Experimental aspects in the vibration-based condition monitoring of large hydrogenerators, International Journal of Rotating Machinery, 2017, 14 p. DOI: [10.1155/2017/1805051](https://doi.org/10.1155/2017/1805051).

18. Rolim F., Tetreault A., Marshall R. Air gap monitoring system key element to correctly diagnose generator problems, II ENAM, Brazil, 2004.
19. Bently Nevada 3500 Series Machinery Monitoring System. URL: <https://www.instrumart.com/productsets/425/bently-nevada-3500-series-machinery-monitoring-system> (access date 01/05/2021).
20. Bently Nevada 3500 Vibration Monitoring System. URL: https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/upgrade-documents/GEA32070ABentlyNevada3500-US-R1-LR.pdf.
21. 2300 Vibration Monitors. Product Datasheet. Bently Nevada Asset Condition Monitoring. URL: <https://www.instrumart.com/assets/2300-Datasheet.pdf>.
22. Randall R.B. Vibration Signals from Rotating and Reciprocating Machines. Vibration-Based Condition Monitoring, 2011, New York, pp. 25-62.
23. Заявка на патент України, МКИ G01B7/14. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в гідрогенераторах / Анатолій Левицький, Вадим Рассовський, Євген Зайцев, Наталія Сорокіна; заявл. Інститут електродинаміки НАН України. – № а202202059; заявл. 16.06.2022.
24. Zaitsev Ie., Levytskyi A. Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. Clean Generators - Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators: монографія/ за ред. Dr. A. Ebrahimi. 200 p.: IntechOpen, 2020, Pp. 25-42. DOI: 10.5772/intechopen.77988.
25. 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, June 22–27, 2003, Dubrovnic, Croatia. TC15. Pp. 1965–1968.

References

1. ISO 19283:2020 Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units. ISO copyright. Office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 p.
2. Levytskyi A.S., Fedorenko H. M., Hruboi O. P. Kontrol stanu potuznykh hidro- ta turbogeneratoriv za dopomohoiu yemnisnykh vymiriuvachiv parametriv mekhanichnykh defektiv: monohrafiia. Kyiv: In-t elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2011. 242 s.
3. Zaitsev I., Bereznychenko V., Bajaj M., Taha I.B.M., Belkhier Y., Titko V., Kamel S. Calculation of capacitive-based sensors of rotating shaft vibration for fault diagnostic systems of powerful generators. Sensors. 2022. vol. 22(1634). 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041634>.
4. Study influence industrial frequency magnetic field on capacitive pressing sensor for large turbogenerator core clamping system/ Zaitsev Ie., Levytskyi A., Kromplyas B., Panchyk M., Bereznychenko V. In Proc. of the 2019 IEEE Ukraine International Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON-2019), 2 – 6 Jule, 2019 Lviv, Ukraine. P. 566–569. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879949>.
5. Levytskyi A.S., Rassovskyi V.L., Zaitsev Ye.O. Novyi yemnisnyi sensor z systemoiu paralelnykh komplanarnykh elektrodov dlia vymiriuvannia povitrianoho zazoru v hidroheneratorakh. Tekhnichna elektrodynamika. 2023. №3. S. 80-85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.080>.
6. Zaitsev I.O., Levytskyi A., Bereznychenko V. Analysis of the technological production defects influence on response function of shaft run-out sensor for generator fault diagnosis system. Ukraine International conference on electrical and computer engineering (UKRCON-2021): Proc. of the International conference. 26 – 28 August, 2019 Lviv, Ukraine. P. 435–438. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575886>.
7. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Hybrid capacitive sensor for hydro- and turbo generator monitoring system. In Proc. of the International conference on modern electrical and energy system (MEES-17) November 15 – 17, 2017 Kremenchuk, Ukraine. 2017. P.288-291. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248913>.
8. Capacitive and inductive sensors for diagnosing air-gap anomalies in synchronous generators / Caetano R.E., Chabu I.E., Stolfi G., Santos J.C., Junior S.N., Gomes C.E., Paiva R.D., Nabeta S.I., Micerino F.J. IEEE IEMDC.2015. P.637-641.
9. Chen T. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multi-layered dielectric structures. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. Vol. 17, №4. R.1307–1318. DOI: 10.1109/TDEI.2010.5539703.
10. Gorbova G. M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor. World Congress : Proceeding XVII IMECO 22–27 June 2003 Dubrovnic, Croatia, 2003. R.1965–1968.
11. Heerens W.C. Multi-terminal capacitor sensors. Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1982. №. 15. R. 137–141.
12. Mamishev A.V. Interdigital dielectrometry sensor design and parameter estimation algorithms for non-destructive materials evaluation. Cambridge: MIT. 1999. 709 p.
13. Aswani G., Maurya O.P., Mahboob R., Khan A.U., Islam T. Design and fabrication of nondestructive capacitive sensors for the moisture measurement in chickpeas and mustard seeds. Sustainability. 2024, №16(5), ID paper 1847. <https://doi.org/10.3390/su16051847>.
14. Li X. B., Larson S. D., Zyuzin A. S., Mamishev A. V. Design principles for multichannel fringing electric field sensors, IEEE Sensors Journal, vol. 6, no. 2, pp. 434-440, DOI: 10.1109/JSEN.2006.870161.
15. EES EAEC. World energy - Installed capacity of HPPs, 2023. [Online]. Available: <https://www.eeseaec.org/ustanovlenaa-mosnost-ges>. Accessed on: May 19, 2023.
16. Complete Monitoring Solutions. URL: <https://www.vibrosystm.com/en/industry/hydro/info> (access date 03/18/2021).
17. Junior G.C.B., Machado R.D., Neto A.C., Martini M.F. Experimental aspects in the vibration-based condition monitoring of large hydrogenerators, International Journal of Rotating Machinery, 2017, 14 p. DOI: 10.1155/2017/1805051.
18. Rolim F., Tetreault A., Marshall R. Air gap monitoring system key element to correctly diagnose generator problems, II ENAM, Brazil, 2004.
19. Bently Nevada 3500 Series Machinery Monitoring System. URL: <https://www.instrumart.com/productsets/425/bently-nevada-3500-series-machinery-monitoring-system> (access date 01/05/2021).
20. Bently Nevada 3500 Vibration Monitoring System. URL: https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/upgrade-documents/GEA32070ABentlyNevada3500-US-R1-LR.pdf.
21. 2300 Vibration Monitors. Product Datasheet. Bently Nevada Asset Condition Monitoring. URL: <https://www.instrumart.com/assets/2300-Datasheet.pdf>.

22. Randall R.B. Vibration Signals from Rotating and Reciprocating Machines. Vibration-Based Condition Monitoring, 2011, New York, pp. 25-62.

23. Zaiavka na patent Ukrainy, MKY G01B7/14. Yemnisnyi sensor dlia vymiruvannya povitrianooho zazoru v hidrohenerotorakh / Anatolii Levyskiyi, Vadym Rassovskiyi, Yevhen Zaitsev, Nataliia Sorokina; zaiavl. Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy. – № a202202059; zaiavl. 16.06.2022.

24. Zaitsev Ie., Levyskiyi A. Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. Clean Generators - Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators: monohrafiia/ za red. Dr. A. Ebrahimi. 200 p.: IntechOpen, 2020, Pp. 25-42. DOI: 10.5772/intechopen.77988.

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, June 22–27, 2003, Dubrovnic, Croatia. TC15. Pp. 1965–1968.