

**ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛІ КОМПЛАНАРНОГО ЄМНІСНОГО СЕНСОРУ****Є. О. Зайцев, В. О. Березниченко, А. С. Левицький, О. Є. Підчібій***Інститут електродинаміки НАН України*

**Анотація.** У статті наведено результати використання засобів комп'ютерного моделювання для дослідження характеристик сенсорів повітряного зазору з метою їх оптимізації. Дослідження проводилися для компланарного ємнісного сенсора з високопотенціальним, низькопотенціальним та заземленим електродами. Показано доцільність використання засобів комп'ютерного моделювання методами скінченно-елементного аналізу для дослідження метрологічних характеристик сенсорів. Представлено результати отриманих картин розподілу еквіпотенціального поля та функції перетворення сенсору.

**Ключові слова:** генератор; вимірювання; ємнісний сенсор; засоби комп'ютерного моделювання; метод скінченних елементів; функція перетворення; еквіпотенціальне електричне поле.

**Вступ**

Повітряний зазор між ротором і статором є одним з найважливіших параметрів, який використовують для моніторингу та контролю функціонального стану потужних електричних машин (гідрогенераторів), так як саме в повітряному зазорі механічна енергія обертання перетворюється в електричну енергію. Контроль цього параметра дозволяє уникнути таких дефектів як: нерівномірність повітряного зазору між ротором та статором по всій окружності, наявність нерівноважених сил всередині машини, нециліндричність форми ротора та статора, зміщення окремих елементів осердя статора, ексцентриситет і т. п [1-3].

Зазвичай в обертових машинах контроль таких параметрів здійснюється з використанням безконтактних сенсорів [4-7]. Враховуючи проведений авторами порівняльний аналіз систем діагностування технічного стану гідроагрегатів в роботах [8-13], для вимірювання параметрів повітряного зазору, у більшості систем використовуються ємнісні сенсори. Основною перевагою таких сенсорів є те, що на їх технічні характеристики не впливають хімічний склад, намагніченість та температура поверхні полюса ротора, але впливають їх конструктивні параметри [13-14]. Тому, виникає необхідність створення комп'ютерних моделей для вибору оптимальних конструктивних параметрів сенсора з урахуванням умов експлуатації [15-18] і особливостей зони контролю та дослідження їх функції перетворення. Використання засобів комп'ютерного моделювання також обумовлено тим, що:

– незважаючи на велику кількість публікацій присвячених ємнісним сенсорам [19-21], в них недостатньо приділено уваги дослідженням їх метрологічних характеристик;

– існуючі аналітичні моделі ємнісних сенсорів, побудовані з використанням методів конформних перетворень безпосереднього розрахунку напруженості електричного поля, які зазвичай базуються на спрощених конфігураціях і ідеалізованих припущеннях, що обмежують точність розрахунку для реальних конструкцій [22];

– результати дослідження картини розподілу напруженості електростатичного поля сенсору надають уявлення про можливість його використання на контрольованому об'єкті;

– на етапі проектування необхідно забезпечити визначення оптимальної конфігурації сенсору та місця його розташування на об'єкті.

**Метою даної статті** є створення та дослідження моделі ємнісного сенсора повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора з компланарним розташуванням електродів для визначення функції перетворення в залежності від значення повітряного зазору між площиною сенсора та заземленою поверхнею полюса ротора засобами комп'ютерного моделювання.

На сьогоднішній день для моделювання більшості об'ємних моделей використовують метод скінченних елементів (FEM – Finite element method). За своєю сутністю – це варіаційний метод з кусочно-поліноміальними базисними функціями. Метод дозволяє досить точно описувати складні криволінійні границі області визначення рішення із заданням граничних умов проведення моделювання.

Процес моделювання методом FEM складається з наступних кроків:

© Зайцев Є. О., Березниченко В. О.,  
Левицький А. С., Підчібій О. Є., 2021

## 1. Створення фізичної моделі

На першому етапі, при моделюванні використовуються електроди з нульовою товщиною. У цьому випадку, довжина прямокутних електродів набагато більша, ніж ширина [23], а проведені дослідження в роботі [24] підтвердили, що розподіл електричного поля уздовж низькопотенціального електрода можна вважати квазі-стаціонарним. Виходячи з цього, 3D-геометрія задачі може бути зведена до 2D моделі. Для реалізації моделі використовується вузол *Geometry*, а сенсора складається із плоских гео-

метричних фігур: високопотенціального **1** та низькопотенціального електрода **2** шириною  $b_1=b_2=b$ , охоронного електрода **3** шириною  $s$  та діелектричної підкладки **4** товщиною  $Th\_Diel$ . Електроди **1-3** розділені діелектричним проміжком шириною  $h$ , яка залежить від технології виготовлення. Металева заземлена частина **5**, що імітує полюс ротора без врахування істинних габаритних розмірів, знаходиться на відстані  $D$  від площини електродів. Конструктивна схема сенсора представлена на рис. 1.

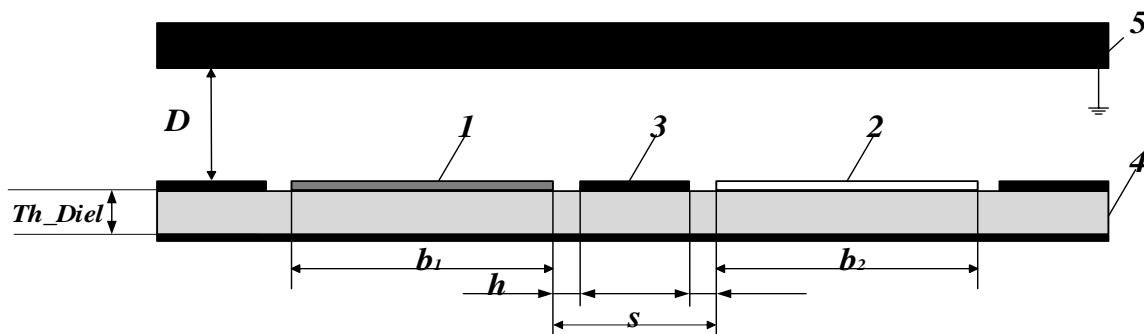


Рис. 1. Конструктивна схема сенсора

## 2. Визначення граничних умов моделі

Для конкретної моделі були використані наступні матеріали: повітря, для областей між електродами та заземленою поверхнею полюса ротора, мідь, як основний матеріал електродів **1-3** та FR4 у якості діелектрика **4**. Властивості матеріалів для усіх фізичних областей моделі задаються в вузлі *Materials*.

Електричні властивості створених елементів моделі задаються у вузлі *Electrostatics* шляхом вибору значень початкових потенціалів на електродах.

Так як функція перетворення зводиться до визначення напруженості електричного поля  $E$  і щільності електричного потоку  $D$ , то для статичного електричного поля повинні виконуватися дві умови.

Перша умова – потік електричного зміщення через замкнену поверхню дорівнює заряду, укладеним всередині неї (закон Гаусса в диференціальній формі) [25]:

$$\nabla \cdot D = \rho_V \quad (1)$$

де  $\rho_V$  – об'ємна щільність електричних зарядів.

Друга умова – закон Ампера для статичного електричного поля в диференціальній формі:

$$\nabla \times E = 0 \quad (2)$$

Електричне зміщення і напруженість електричного поля пов'язані між собою співвідношенням:

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad (3)$$

де:  $\varepsilon$  – діелектрична проникність діелектрика між пластинами;  $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – діелектрична проникність вакууму.

Дана програма розглядає тільки лінійні залежності між напруженістю і зміщенням. Для спрощення обчислення поля і задоволення двох вищевказаних умов (2, 3), програма використовує співвідношення:

$$E = -\nabla \cdot V \quad (4)$$

де  $V$  – різниця потенціалів.

У цьому випадку умова (3) виконується завжди, так як  $\nabla \times \nabla \cdot V \equiv 0$ , а умова (4) – закон Гаусса – приводить до рівняння:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \cdot \nabla \cdot V) = \rho_V \quad (5)$$

## 3. Дискретизація фізичної моделі шляхом розбиття сіткою на комірки

Побудова скінченно-елементної сітки здійснюється в дереві моделі у вузлі *Mesh*, де виконується триангуляція обраних областей для подальших розрахунків. На рис. 2 показано імітаційну CAD-модель сенсора із сіткою, яка містить 4155 елементів.

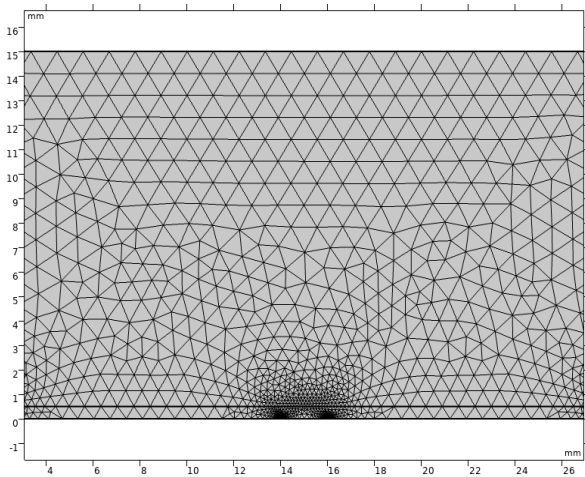


Рис. 2. CAD-модель сенсора

#### 4. Попередня обробка

Далі для проведення попередніх досліджень розподілення потенціалів зарядів в електричному полі сенсора використовується вузол *Study*.

#### 5. Отримання результатів

Після виконання обчислень моделі у вузлі *Results* створюються групи типу:

– *Electric Potential – 2D Plot Group – Surface1*, що відображає графік розподілу електричного потенціалу сенсора, що приведено на рис. 3;

– *Electric Potential – 2D Plot Group – Streamline 1*, що відображає контурний графік потенціальних ліній приведено на рис. 4.

Результати розрахунку функції перетворення сенсора в залежності від відстані до заземленої поверхні представлені в таблиці 1. Для проведення розрахунків було використано розділ *Results – Derived Values – Global Evaluation*

Графік залежності значення ємності від відстані до заземленої поверхні представлено на рис.5

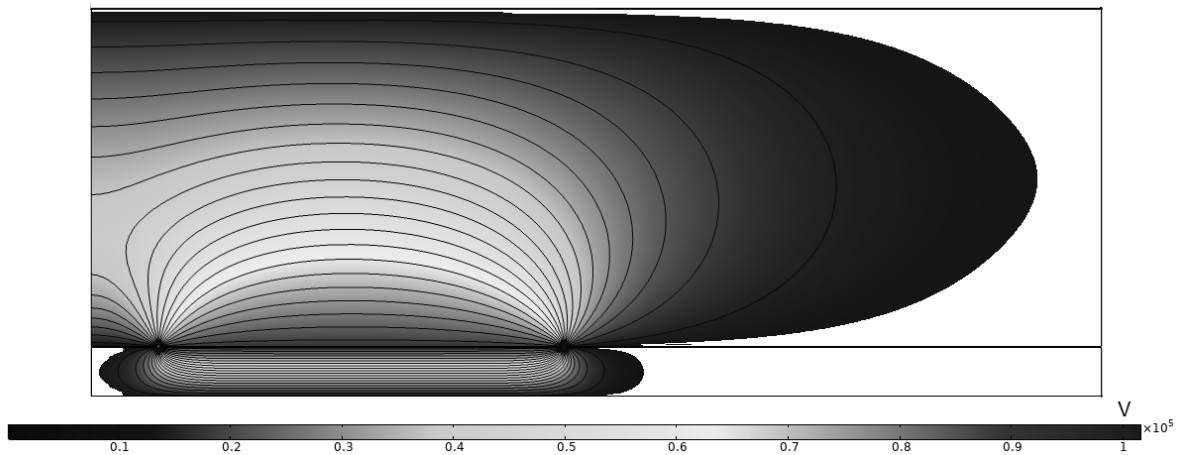


Рис. 3. Графік розподілу електричного потенціалу сенсора

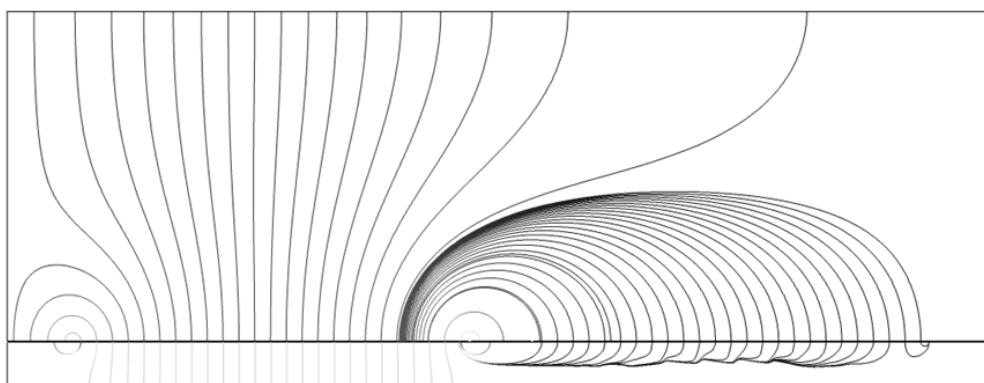


Рис. 4. Контурний графік потенціальних ліній сенсора



Рис. 5. Графік залежності значення ємності від відстані до заземленої поверхні

Таблиця 1

## Результати розрахунків

№ п/п	d, мм	Cm, 10 <sup>-12</sup> Ф
1	2.00	0.06
2	2.50	0.08
3	3.00	0.11
4	3.50	0.14
5	4.00	0.16
6	4.50	0.19
7	5.00	0.22
8	5.50	0.24
9	6.00	0.27
10	6.50	0.29
11	7.00	0.32
12	7.50	0.34
13	8.00	0.36
14	8.50	0.38
15	9.00	0.40
16	9.50	0.41
17	10.00	0.43

**Висновки**

Використання методу скінченних елементів для створеної скінченно-елементної моделі конструкції ємнісного сенсора повітряного зазору дозволило визначити функцію перетворення в залежності від значення відстані між площиною електродів сенсора та заземленою плоскою металеву поверхню полюса ротора засобами комп'ютерного моделювання. Отримані результати свідчать про те, що розроблена модель може бути використана для визначення функції перетворення сенсорів та дослідження їх інших метрологічних характеристик, наприклад визначення впливу паразитних ємностей на функцію перетворення сенсора.

**Список використаної літератури**

1. ISO 20816-5:2018. Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants ISO20\_1 [Text]. – Intr. 2018. – 60 p.
2. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1: General guidelines [Text]. – Intr. 2016. – 46 p.
3. ISO 7919-5:2005. Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants [Text]. – Intr. 2005. – 16 p.
4. Zaitsev, Ie. Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator [Text] / Ie. Zaitsev, A. Levytskyi // Clean Generators - Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators : монографія / for ed. Dr. A. Ebrahimi. – London: Intechopen, 2020, – P. 25–42.
5. Левицкий, А. С. Измерительный преобразователь для емкостного сенсора воздушного зазора в гидрогенераторе [Текст] / А. С. Левицкий, Е. А. Зайцев, В. А. Березниченко, А. Е. Сухорукова // Приборы и методы измерений. – 2020. – №.1(Т.11). – С. 33–41.
6. Zaitsev, I. O. Characteristic of capacitive sensor for the air gap control system in the hydro-generator [Text] // I. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi, B. A. Kromplyas / 2017 IEEE First Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON) May 29 – June 2, 2017 Kyiv, Ukraine – 2017. – С.390–394
7. Zaitsev, I. O. Hybrid capacitive sensor for hydro- and turbo generator monitoring system [Text] / I. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi, B. A. Kromplyas // Proceedings of the International conference on mod-

ern electrical and energy system (MEES-17) November 15 – 17, 2017 Kremenchuk, Ukraine – 2017. – P. 288–291.

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

9. Левицький, А. С. Методи та прилади автоматичного виміру повітряного зазору в гідро-генераторах [Текст] / А. С. Левицький // Гідроенергетика України. – 2007. – №. 4. – С. 29–35.

10. Петров, Ю. В. Неравномерность воздушного зазора гидрогенератора и ее влияние на вибрацию статора [Текст] / Ю. В. Петров // Электрические станции. – 1974. – №.1. – С.25–28.

11. Поташник, С. И. Некоторые дефекты капсульных гидрогенераторов и их идентификация с помощью датчиков воздушного зазора [Текст] / С. И. Поташник // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2009. – №.24. – С.67–74.

12. Федоренко, Г. М. Вплив параметрів повітряного зазору на характеристики гідрогенераторів [Текст] / Г. М. Федоренко, В. О. Саратов, В. В. Черниш // Гідроенергетика України. – 2005. – №.4. – С.26–33.

13. Джежора, А. А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета [Текст] / А. А. Джежора – Минск : Белорусская наука, 2008. – 305 с.

14. Zaitsev, I. O. Determination of response characteristic of capacitive coplanar air gap sensor [Text] / I. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi // Proceedings of the 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017) 29 – 30 August, 2017 Kyiv, Ukraine – 2017. – P. 85–88.

15. Zaitsev, Ie. O. Research of a capacitive distance sensor to grounded surface [Text] / Ie. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi, A. I. Novik, V. O. Bereznychenko, A. M. Smyrnova // Telecommunications and radio engineering – №78(2), 2019 – P.173–180.

16. Zaitsev, Ie. O. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system [Text] / Ie. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi, B. A. Kromplyas // Proceedings of the 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 16 – 18, 2019 Kiev, Ukraine. – P.644–647.

17. Study influence industrial frequency magnetic field on capacitive pressing sensor for large turbogenerator core clamping system [Text] / Ie. Zaitsev, A. Levytskyi, B. Kromplyas, M. Panchyk, V. Bereznychenko // Proceedings of the 2019 IEEE Ukraine International Conference On Electrical And

Computer Engineering (UKRCON-2019), 2 – 6 June, 2019 Lviv, Ukraine. – P. 566–569.

18. Левицкий, А. С. Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора [Текст] / А. С. Левицкий, Е. А. Зайцев, К. А. Кобзарь // Приборы и методы измерений. – 2018 – Т.9(2) – С. 121–129.

19. Евстигнеев, В. В. Перспективные направления проектирования и принципы расчета бесконтактных емкостных измерителей микроперемещений [Текст] / В. В. Евстигнеев, О. И. Хомутов, Г. М. Горбова // Ползуновский альманах. – Барнаул, 1999. – № 2. – С. 45–58.

20. Min-Hang, B. Electrostatic driving and capacitive sensing. Handbook of Sensors and Actuators [Text] / B. Min-Hang – Vol. 8. – 2000. – P.139–198.

21. Mikalauskas, R. Air gap modelling and control possibilities in rotary systems [Text] / R. Mikalauskas, V. Voikovas // Ultragarasas. – 2003. – Vol. 1 (46). – P. 7–11.

22. Юссель, Ю. Я. Розрахунок електричної ємності [Текст] / Ю. Я. Юссель, Е. С. Качанов, М. Г. Струнковой. – Л.: Енергія, 1960. – 240 с.

23. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в генераторах [Текст]: Патент України на винахід UA 115924 C2, G01B 7/14, G01D 5/24. / Левицький А. С., Зайцев Є. О., Кромпльяс Б. А.; заявник Інститут електродинаміки НАН України. – № а 2016 03404; заявл. 01.04.2016; публ. 10.01.2018, Бюл. № 1/2018.

24. Зайцев, Є. О. Дослідження моделі сенсору повітряного зазору в потужних гідрогенераторах на основі комп'ютерного моделювання [Текст] / Є. О. Зайцев, О. Є. Сухорукова // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 14-15 травня 2020 р.). – К.: Інтерсервіс, 2020. – С. 506–512.

25. Mamishev, A. V. Interdigital Dielectrometry Sensor Design and Parameter Estimation Algorithms for Non-Destructive Materials Evaluation [Text] / A. V. Mamishev – Cambridge: MIT, 1999. – 709 p.

## References

1. ISO 20816-5 (2018). Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants ISO20\_1. 60 p.

2. ISO 20816-1 (2016). Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1: General guidelines. 46 p.

3. ISO 7919-5 (2005). Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements

on rotating shafts . Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants. 16 p.

4. Zaitsev, Ie., Levytskyi, A., (2020). Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. In: Clean Generators - Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators. editor. Dr. A. Ebrahimi. London: Intechopen, pp. 25–42.

DOI: 10.5772/intechopen.77988.

5. Levytskyi, A. S., Zaitsev, I. O., Bereznychenko, V. O., Sukhorukova, O. E., (2020). Measuring transducer for air gap capacitive sensor in hydrogenerator [Izmeritel'nyy preobrazovatel' dlya yemkostnogo sensora vozdušnogo zozora v gidrogeneratore]. *Devices and methods of measurements*, Vol. 11(1). pp. 33–41. DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41.

6. Zaitsev, I. O., Levytskyi, A. S., Kromplyas, B. A., (2017). Characteristic of capacitive sensor for the air gap control system in the hydrogenerator. In: Proc. of the 2017 IEEE First Ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON) May 29 – June 2, 2017 Kyiv (Ukraine) pp.390–394. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100516

7. Zaitsev, I. O., Levytskyi, A. S., Kromplyas, B. A., (2017). 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, Kremenchuk(Ukraine), pp.288–291 DOI: 10.1109/MEES.2017.8248913

8. Levytskyi, A. S., Fedorenko, G. M., Gruboj, O. P., (2011). Monitoring of powerful hydro- and turbogenerators by means of capacitive meters of parameters of mechanical defects [Kontrol' stanu potuzhnykh hidro- ta turbogeneratoriv za dopomohoyu yemnisnykh vymiryuvachiv parametriv mekhanichnykh defektiv]. IED NANU: Kiev. 2011. 242 p

9. Levytskyi, A. S., (2007). Methods and devices for automatic measurement of air gap in hydro-generators [Metody ta pryklady avtomatychnoho vymiryu povitryanoho zozoru v hidro-heneratorakh]. *Hydropower of Ukraine*. Vol. 4. pp. 29–35.

10. Petrov, Yu. V., (1974). Irregularity of the air gap of the hydrogenerator and its influence on the vibration of the stator [Neravnomernost' vozdušnogo zozora gidrogeneratora i yeye vliyanie na vibratsiyu statora]. *Electric stations*. Vol. 1. pp. 25–28.

11. Potashnik, S. I., (2009). Some defects of capsule hydrogenerators and their identification using air gap sensors [Nekotoryye defekty kapsul'nykh gidrogeneratorov i ikh identifikatsiya s pomoshch'yu datchikov vozdušnogo zozora]. *Proceedings of the*

*Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Vol. 24. pp. 67–74.

12. Fedorenko, G. M., Saratov, V. O., Chernysh, V. V., (2005). Influence of air gap parameters on the characteristics of hydrogenerators [Vplyv parametriv povitryanoho zozoru na kharakterystyky hidroheneratoriv]. *Hydropower of Ukraine*. Vol. 4. pp. 26–33.

13. Dzhazhora, A. A., (2008). Electric capacitive converters and methods of their calculation [Elektroyemkostnyye preobrazovateli i metody ikh rascheta]. Minsk: Belorusskaya nauka. 305 p.

14. Zaitsev, I. O., Levytskyi, A. S. (2017). Determination of response characteristic of capacitive coplanar air gap sensor. In: Proc.of the 2017 IEEE microwaves, radar and remote sensing symposium (MRRS-2017), August 29 – June 30, Kyiv(Ukraine), pp. 85–88. DOI: 10.1109/MRRS.2017.8075034

15. Zaitsev, Ie. O., Levytskyi, A. S., Novik, A. I., Bereznychenko, V. O., Smyrnova, A. M., (2019). Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and radio engineering*, Vol.78(2). pp. 173–180 DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80.

16. Zaitsev, Ie.O., Levytskyi, A. S., Kromplyas, B. A., (2019). Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. In: Proc.of the 2019 IEEE 39th International conference on electronics and nanotechnology (ELNANO), April 16–18, Kiev(Ukraine), pp. 644–647 DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783916

17. Zaitsev, Ie., Levytskyi, A., Kromplyas, B., Panchyk, M., Bereznychenko, V., (2019). Study influence industrial frequency magnetic field on capacitive pressing sensor for large turbogenerator core clamping system. In: Proc. of the 2019 IEEE Ukraine international conference on electrical and computer engineering (UKRCON-2019), 2 – 6 Jule, Lviv(Ukraine), pp. 566–569. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879949

18. Levytskyi, A. S., Zaitsev, I. O., Kobzar, K. O., (2018). Measuring the stroke of cone disk springs in power accumulators of the turbogenerator stator core using a capacitive sensor [Izmereniye khoda tarel'chatykh pruzhin v silovykh akkumulyatorakh serdechnika statora turbogeneratora s pomoshch'yu yemkostnogo sensora]. *Devices and methods of measurements*. Vol.9(2). pp. 121–129. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129.

19. Evstigneev, V. V., Khomutov, O. I., Gorbova, G. M., (1999). Prospective directions of design and principles of calculation of non-contact capacitive microdisplacement meters [Perspektivnyye napravleniya proyektirovaniya i printsipy rascheta beskontaknykh yemkostnykh izmeriteley mikroperemeshcheniy]. *Polzunovskiy Almanac*. Vol. 2. pp.

45–58 (in Russian)

20. Min-Hang, B., (2000). Electrostatic driving and capacitive sensing. In: *Handbook of Sensors and Actuators*. Vol. 8. pp.139–198.

21. Mikalauskas, R., Voikovas, V., (2003). Air gap modelling and control possibilities in rotary systems. *Ultragarsas*. Vol. 1 (46). pp. 7–11.

22. Iossel, Yu.Ya., Kachanov, E. S., Strunskoy, M. G., (1960). Calculation of electric capacity. L.: Energy. 240 p.

23. Levytskyi, A. S., Zaitsev, I. O., Kromplyas, B. A., (2016). Capacitive sensor for measuring the air gap in generators [Yemnisnyy sensor dlya vymiryuvannya povitryanoho zazoru v henerato-

rakh]. MKI G01B7/14 № a 2016 03404.

24. Zaitsev, Ie., Sukhorukova, O., (2020). Study of the air gap sensor model in powerful hydrogenerators based on computer simulation [Doslidzhennya modeli sensoru povitryanoho zazoru v potuzhnykh hidroheneratorakh na osnovi komp'yuternoho modelyuvannya]. In: Proc. XXI International Scientific and Practical Conference of the Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century. Kyiv, May 14–15, 2020. pp. 506–512.

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

## USE OF THE FINITE ELEMENTS METHOD FOR THE IMPLEMENTATION OF THE COPLANAR CAPACITIVE SENSOR MODEL

Ie. Zaitsev, V. Berezhnychenko, A. Levytskyi, O. Pidchibii

*The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine*

**Abstract.** *The article presents the results of using computer simulation tools to study the characteristics of air gap sensors for the purpose of their optimization. The model is used to study the characteristics of air gap sensors in for the purpose of their further optimization depending on the design parameters of diagnosing object, which mainly depends on the type of powerful hydro generator. Changes in the air gap between the rotor and the stator can occur for a number of reasons, which are due to: shortcomings in the design, manufacture, installation and auxiliary alignments when fitting machine elements during assembly, aging components during operation, subsidence of the foundation, the negative impact of temperature changes, as available centrifugal and magnetic forces that occur on the machine during its operation. Changing the unevenness of the air gap in hydrogenerators largely determines its technical and economic performance, behavior during commissioning and during the entire operating period, because it is in the air gap is the conversion of mechanical rotating energy into electricity. To control the parameters of the gap became wider use capacitive sensors. The study performed a coplanar capacitive air gap sensor with high-potential, low-potential and grounded electrodes. The model is used to study the picture of the electric field in the specified sensor, as well as to determine the transformation function "air gap - electrical capacity of the sensor". The results of obtained patterns of equipotential field distribution and sensor response characteristic are presented.*

**Keywords:** *generator; measurement; capacitive sensor; computer simulation tools; finite element method; transfer function; equipotential electric field.*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ КОМПЛАНАРНОГО ЕМКОСТНОГО СЕНСОРА

Е. А. Зайцев, В. А. Березниченко, А. С. Левицкий, А. Е. Пидчибий

*Институт электродинамики НАН Украины*

**Аннотация.** *В статье приведены результаты использования средств компьютерного моделирования для исследования характеристик сенсоров воздушного зазора с целью их оптимизации. Исследования проводились для компланарного емкостного сенсора с высокопотенциальным, низкопотенциальным и заземленным электродами. В ходе проведения исследований было показано целесообразность использования средств компьютерного моделирования методами конечно-элементного анализа для исследования метрологических характеристик сенсоров. Представлены результаты полученных картин распределения эквипотенциального поля и функции преобразования сенсора.*

**Ключевые слова:** *генератор; измерения; емкостной сенсор; средства компьютерного моделирования; метод конечных элементов; функция преобразования; эквипотенциальные электрическое поле.*

Отримано 04.04.2021



**Зайцев Євген Олександрович**, Національна академія наук України Інститут електродинаміки, доктор технічних наук, с.н.с., провідний науковий співробітник відділу електричних та магнітних вимірювань. Просп. Перемоги 56, 03057, Київ, Україна

E-mail: [zaitsev@i.ua](mailto:zaitsev@i.ua), тел.: +38-068-240-25-73

**Ievgen Zaitsev**, The National Academy of Sciences of Ukraine The Institute of Electrodynamics, Dr. of Science, Senior Research Fellow of Department of electrical and magnetic measurements. pr. Peremohy, 56, Kyiv, Ukraine

E-mail: [zaitsev@i.ua](mailto:zaitsev@i.ua), tel.: +38-068-240-25-73

**ORCID ID:** 0000-0003-3303-471X



**Левицький Анатолій Станіславович**, Національна академія наук України Інститут електродинаміки, доктор технічних наук, с.н.с., провідний науковий співробітник відділу електричних та магнітних вимірювань. Просп. Перемоги 56, 03057, Київ, Україна

E-mail: [levitskiyanatoliymail@gmail.com](mailto:levitskiyanatoliymail@gmail.com), тел.: +38-044-366-24-70

**Anatolii Levytskyi**, The National Academy of Sciences of Ukraine The Institute of Electrodynamics, Dr. of Science, Senior Research Fellow of Department of electrical and magnetic measurements. pr. Peremohy, 56, Kyiv, Ukraine

E-mail: [levitskiyanatoliymail@gmail.com](mailto:levitskiyanatoliymail@gmail.com), tel.: +38-044-366-24-70

**ORCID ID:** 0000-0002-0146-9498



**Березниченко Вікторія Олександрівна**, Національна академія наук України Інститут електродинаміки, аспірантка відділу електричних та магнітних вимірювань. Просп. Перемоги 56, 03057, Київ, Україна

E-mail: [vika.bereznichenko@i.ua](mailto:vika.bereznichenko@i.ua), тел.: +38-044-366-24-70

**Viktoriia Bereznychenko**, The National Academy of Sciences of Ukraine The Institute of Electrodynamics, Ph. Student of Department of electrical and magnetic measurements. pr. Peremohy, 56, Kyiv, Ukraine

E-mail: [vika.bereznichenko@i.ua](mailto:vika.bereznichenko@i.ua), tel.: +38-044-366-24-70

**ORCID ID:** 0000-0002-9961-1703



**Підчібій Олександра Євгенівна**, Національна академія наук України Інститут електродинаміки, інженер відділу електричних та магнітних вимірювань. Просп. Перемоги 56, 03057, Київ, Україн О.Є. Підчібій, інж.

E-mail: [sandrasu2014@gmail.com](mailto:sandrasu2014@gmail.com), тел.: +38-044-366-24-70

**Oleksandra Pidchibii**, The National Academy of Sciences of Ukraine The Institute of Electrodynamics, Engineer of Department of electrical and magnetic measurements., pr. Peremohy, 56, Kyiv, Ukraine

E-mail: [sandrasu2014@gmail.com](mailto:sandrasu2014@gmail.com), tel.: +38-044-366-24-70

**ORCID ID:** 0000-0003-1310-9358