

ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

УДК 681.586.772

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.107>**РОЗРАХУНОК ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА РАДІАЛЬНОГО БИТТЯ ВАЛІВ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ****В.О. Березниченко**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: vika.bereznichenko@i.ua

У статті наведено результати використання засобів комп'ютерного моделювання для дослідження характеристик ємнісних сенсорів биття задля їхньої оптимізації. У процесі дослідження, яке проводилося для концентричного ємнісного сенсора з високопотенціальним та заземленим електродами, було показано доцільність використання засобів комп'ютерного моделювання методами кінцево-елементного аналізу для розгляду метрологічних характеристик сенсорів. Показано, що застосування моделювання дає можливість зменшити часові витрати на дослідження функції перетворення та метрологічних характеристик. Наведено картину розподілу еквіпотенціальних ліній електричного поля в робочому зазорі сенсора. Результати моделювання дають змогу створювати картину еквіпотенціальних ліній за зміни відстані між загальною поверхнею електродів сенсора та заземленою поверхнею, що імітує поверхню вала. Наведено табличні та графічні результати визначення функції перетворення. Бібл. 23, рис. 5, табл.

Ключові слова: генератор, функціональний стан, вібрація, сенсор, безконтактний, комп'ютерне моделювання.

Постановка проблеми. У потужних гідроагрегатах для перетворення енергії води в електричну енергію використовується генератор та водяна турбіна, які з'єднуються між собою валом [1]. Відхилення параметрів обертового руху вала гідроагрегата від заданих норм є дефектом, який необхідно контролювати для запобігання виникненню аварійних ситуацій [2–4]. У цьому разі найбільш інформативним є контроль як відносного, так і абсолютного коливного руху поверхні вала [5]. Зазвичай такий контроль здійснюється з використанням безконтактних сенсорів. На основі порівняльного аналізу систем діагностування технічного стану гідроагрегатів було встановлено, що для вимірювання параметрів биття валів найбільш перспективними є ємнісні сенсори [5–11]. Основною перевагою таких сенсорів є те, що на їхні технічні характеристики не впливають хімічний склад, намагніченість та температура поверхні вала, але впливають їхні конструктивні параметри. Тому виникає необхідність створення комп'ютерної моделі для вибору оптимальних конструктивних параметрів сенсора з урахуванням умов експлуатації і особливостей зони контролю та дослідження їхньої функції перетворення. Використання засобів комп'ютерного моделювання також обумовлено тим, що:

– попри велику кількість публікацій, присвячених ємнісним сенсорам [12–20], у них недостатню увагу приділено дослідженням їхніх метрологічних характеристик;

– існуючі аналітичні моделі ємнісних сенсорів, побудовані з використанням методів конформних перетворень безпосереднього розрахунку напруженості електричного поля, зазвичай базуються на спрощених конфігураціях та ідеалізованих припущеннях, що обмежує точність розрахунку для реальних конструкцій [21–23];

– результати дослідження картини розподілу напруженості електростатичного поля сенсора надають уявлення про можливість його використання на контрольованому об'єкті задля визначення оптимальної конфігурації сенсора та місця його розташування на об'єкті.

Ціллю цієї статті є створення моделі ємнісного сенсора радіального биття вала гідрогенератора з концентричним високопотенціальним електродом та заземленим охоронним кільцем для розрахунку функції перетворення залежно від значення повітряного

зазора між площиною сенсора та заземленою поверхнею вала засобами комп'ютерного моделювання.

На сьогодні для моделювання об'ємних об'єктів здебільшого використовують метод скінченних елементів (FEM – Finite element method). За своєю сутністю – це варіаційний метод із кусково-поліноміальними базисними функціями. Метод дає змогу досить точно описувати складні криволінійні границі області визначення рішення та задання граничних умов проведення моделювання.

Процес моделювання методом FEM складається з таких кроків:

1. Створення фізичної моделі. На першому етапі для побудови моделі концентричного сенсора використовується двовимірний осесиметричний простір 2D Axisymmetric.

У цьому разі для реалізації моделі використовується вузол Geometry, а сенсор складається із плоских геометричних фігур: високопотенціального електрода 1 радіусом $r = 8$ мм, заземленого кільця завширшки $w_{GND} = 1,9$ мм та діелектричної підкладки 3 заввишки $H_{diel} = 1$ мм. Електроди 1 і 2 відокремлені один від одного тонкими діелектричними проміжками шириною $h = 0,1$ мм, яка залежить від технології виготовлення. Металева заземлена частина вала 4 розташовується на відстані $d = 0,3 \div 2,3$ мм. Побудова імітаційної моделі частини вала здійснювалася без урахування дійсних габаритних розмірів. Конструктивна схема сенсора наведена на рис. 1.

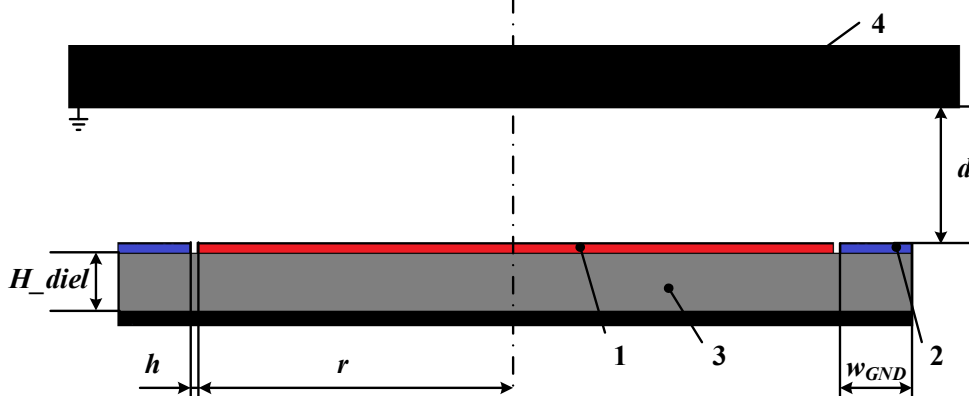


Рис. 1

2. Визначення граничних умов моделі. Для конкретної моделі були використані такі матеріали: повітря (для ділянок між електродами та заземленою поверхнею вала), мідь як основний матеріал електродів 1 і 2 та FR4 як діелектрик 3. Властивості матеріалів для всіх фізичних ділянок моделі задаються в модулі Materials.

Електричні властивості створених елементів моделі задаються у вузлі Electrostatics через вибір значень початкових потенціалів на електродах.

3. Дискретизація фізичної моделі через розбиття сіткою на комірки. Побудова

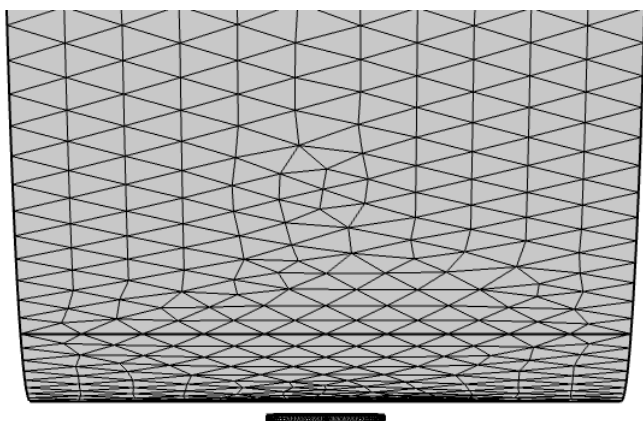


Рис. 2

скінченно-елементної сітки здійснюється в дереві моделі у вузлі Mesh, де виконується триангуляція обраних ділянок для подальших розрахунків. На рис. 2 показано реалізовану імітаційну САД-модель сенсора із сіткою, яка містить 310581 елемент.

4. Подальша обробка. Далі для проведення попередніх досліджень розподілення потенціалів зарядів у 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 показує графік розподілу електричного потенціалу сенсора, який наведено на рис. 3;
- Electric Potential, Revolved Geometry (es) – 3D Plot Group – Streamline 1, що показує контурний графік потенціальних ліній в розрізі, наведено на рис. 4.

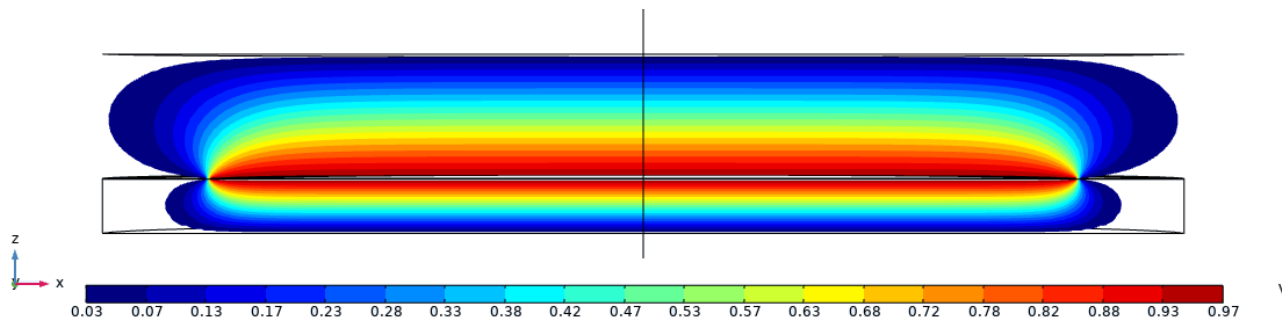


Рис. 3

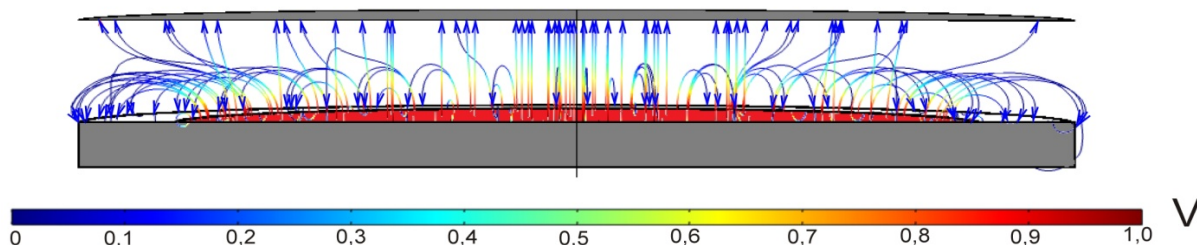


Рис. 4

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

Таблиця 1

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d, \text{мм}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
$C_M, 10^{-12} \Phi$	8.46	7.00	6.13	5.56	5.15	4.85	4.61	4.43	4.23	4.15

Продовження таблиці 1

№ п/п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$d, \text{мм}$	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3
$C_M, 10^{-12} \Phi$	4.05	3.96	3.89	3.82	3.76	3.71	3.67	3.63	3.59	3.56	3.53

На рис. 5 наведено графіки залежності значення ємності від відстані до заземленої поверхні, розраховані аналітично C_C та засобами комп'ютерного моделювання C_M . Різниця зумовлена нехтуванням ширини охоронного електрода під час розрахунку значення ємності аналітичним способом. Під час розрахунків ширина електрода приймалася нескінченно великою.

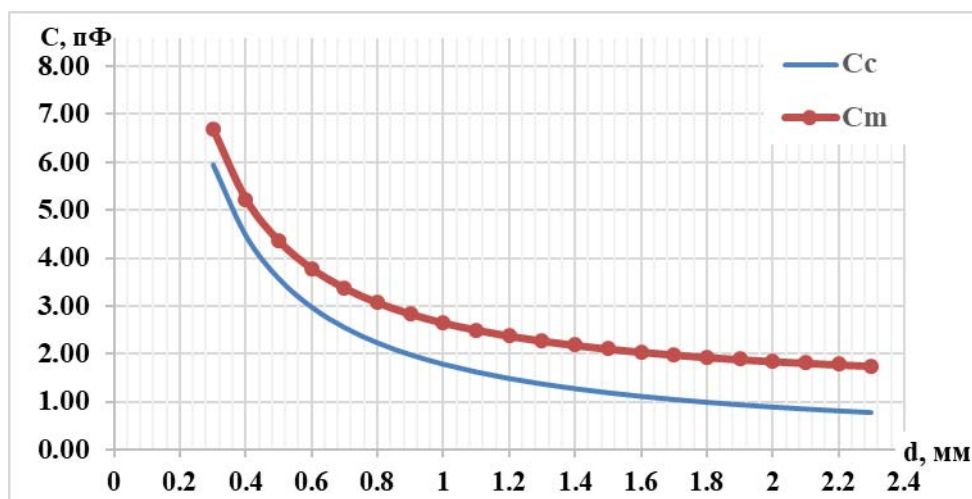


Рис. 5

Висновки. Використання методу скінченних елементів та створеної скінченно-елементної моделі конструкції ємнісного сенсора биття дало змогу розрахувати функцію перетворення залежно від значення повітряного зазора між площиною електродів сенсора та заземленою металеву поверхнею вала засобами комп'ютерного моделювання. Отримані результати свідчать про те, що розроблена модель може бути використана для визначення функції перетворення сенсорів та дослідження метрологічних характеристик, наприклад, похибки, зумовленої впливом паразитних ємностей.

Фінансується за держбюджетною темою «Створення ємнісних вимірювачів зусиль у стяжних призмах осердя статора потужного турбогенератора» (шифр «Контроль-М»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 07.07.2015, протокол № 11. Державний реєстраційний № 0115U004416. КПКВК 6541030.

1. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов: монография. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 144 с.
2. ISO 20816-5:2018. Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants. Released: 2018-12-01. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2018. 60 p.
3. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration . Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1: General guidelines ISO79. Released: 2016-11-30. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2016. 46 p.
4. 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. Released:2005-04. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2005. 16 p.
5. Левицький А.С., Зайцев Є. О., Березниченко В. О. Відносна та абсолютна радіальна вібрація вала вертикального гідроагрегата. *Гідроенергетика України*. 2019. № 3–4. С. 36–39.
6. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Березниченко В.О. Особливості вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь вала гідроагрегату. *Гідроенергетика України*. 2019. №. 1–2. С. 39–44.
7. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. Proceedings of the 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 16–18, 2019, Kiev, Ukraine. Pp. 644–647. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783916>
8. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Hybrid capacitive sensor for hydro- and turbo generator monitoring system. Proceedings of the International conference on modern electrical and energy system (MEES-17) November 15–17, 2017, Kremenchuk, Ukraine. 2017. Pp. 288–291. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248913>
9. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S. Determination of response characteristic of capacitive coplanar air gap sensor. Proceedings of the 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017) August 29 – June 30, 2017 Kyiv, Ukraine. 2017. Pp. 85–88. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRRS.2017.8075034>
10. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Characteristic of capacitive sensor for the air gap control system in the hydrogenerator. Proceedings of the 2017 IEEE First Ukraine Conference On Electrical And Computer

- Engineering (UKRCON)* May 29 – June 2, 2017 Kyiv, Ukraine. 2017. Pp. 390–394. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100516>
11. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. Похибки ємнісного вимірювача зазору в гідрогенераторі. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 44. С. 50–55.
 12. Mamishev A. V. Interdigital dielectrometry sensor design and parameter estimation algorithms for non-destructive materials evaluation. Ph.D. dissertation. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, USA, 1999. 709 p.
 13. Huang Y., Zhan Z., Bowler N. Optimization of the coplanar interdigital capacitive sensor. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 36. Pp. 110017-8 DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4974695>
 14. Mamishev A. V., Sundara-Rajan K., Yang F., Du Y., and Zahn M. Interdigital Sensors and Transducers. *Proceedings of the IEEE*. 2004. Vol. 92. No 5. Pp. 808–845.
 15. Nassr A. A., Ahmed W.H., El-Dakhkhni W. W. Coplanar capacitive sensors for detecting water intrusion in composite structures. *Measurement Science and Technology*. 2008. Vol. 19. No 7. Pp. 075702–075709. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/7/075702>
 16. Yin X., Hutchins D. A., Chen G., Li W., Xu Z. Studies of the factors influencing the imaging performance of the capacitive imaging technique. *NDT & E International*. 2013. Vol. 60. Pp. 1–10.
 17. Rolando N. A. C., Kerkvliet H. M. M. and Gerard C. M. M. Design and empirical investigation of capacitive humandetectors with opened electrodes. *Measurement Science and Technology*. 2009. Vol. 21. No 1. Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/1/015802>
 18. Zhu F., Spronck J.W., Heerens W.C. A simple capacitive displacement sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 1991. Vol. 26. No 1–3. Pp. 265–269.
 19. Hu X. and Yang W. Planar capacitive sensors – designs and applications. *Sensor Review*. 2010. Vol. 30. No 1. Pp. 24–39. DOI: <https://doi.org/10.1108/02602281011010772>
 20. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Berezhnychenko V.O. Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 2. No 78. Pp. 173–180. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80>
 21. Юссьель Ю.Я., Качанов Е.С., Струнковой М.Г. Розрахунок електричної ємності: монографія. Л.: Енергія, 1981. 288 с.
 22. Heerens W.C. Multi-terminal capacitor sensors. *Journal of Physics E Scientific Instruments*. Vol.15. 1982. Pp. 137–141.
 23. Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.

DEFINITION OF THE SHAFTS RADIAL BEATING CAPACITIVE SENSOR RESPONSE FUNCTION BY COMPUTER MODELING

V.O. Berezhnychenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: vika.bereznichenko@i.ua

The paper presents the results study the characteristics of capacitive beating sensors to optimize them by computer simulation tools using. A concentric capacitive sensor with high-potential and grounded electrodes was studied. In the course of the research, the expediency of using computer modeling tools by finite element analysis methods to study the metrological characteristics of sensors was shown. It is shown that the application of modeling makes it possible to reduce the time spent on studies of the transformation function and metrological characteristics. The picture of the distribution of equipotential lines of an electric field in a working backlash of the sensor has resulted. The simulation results make it possible to create a picture of equipotential lines by changing the distance between the total surface of the sensor electrodes and the grounded surface, simulating the surface of the shaft. The results of the definition of the response function are given. References 23, figures 5, table.

Keywords: generator, functional state, radial beating, sensor, contactless, computer simulation.

1. Alekseev B.A. Determining the status (diagnostics) of large hydro generators. ENAS, 2002. 144 p. (Rus)
2. ISO 20816-5:2018. Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants. Released: 2018-12-01. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2018. 60 p.
3. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration . Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1: General guidelines ISO79. Released: 2016-11-30. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2016. 46 p.

4. 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. Released:2005-04. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2005. 16 p.
5. Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Berezhnychenko V.O. Relative and absolute radial vibration of the shaft of the vertical unit. *Hidroenerhetyka Ukrainy*. 2019. No 3–4. Pp. 36–39. (Ukr)
6. Levitsky A.S., Zaitsev I.O., Berezhnychenko V.O. Features measuring radial run-out hydraulic unit shaft cylindrical surfaces. *Hidroenerhetyka Ukrainy*. 2019. No 1–2. Pp. 39–44. (Ukr)
7. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. Proceedings of the 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 16–18, 2019, Kiev, Ukraine. Pp. 644–647. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783916>
8. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Hybrid capacitive sensor for hydro- and turbo generator monitoring system. Proceedings of the International conference on modern electrical and energy system (MEES-17) November 15–17, 2017 Kremenchuk, Ukraine. 2017. Pp. 288–291. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248913>
9. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S. Determination of response characteristic of capacitive coplanar air gap sensor. Proceedings of the 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017) August 29 – June 30, 2017 Kyiv, Ukraine. 2017. Pp. 85–88. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRRS.2017.8075034>
10. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Characteristic of capacitive sensor for the air gap control system in the hydrogenerator. Proceedings of the 2017 IEEE First Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON) May 29 – June 2, 2017 Kyiv, Ukraine. 2017. Pp. 390–394. DOI: <https://doi.org/0.1109/UKRCON.2017.8100516>
11. Levitsky AS, Zaitsev I.O., Kromplyas BA Errors of the capacitive gauge in the hydrogenerator. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2016. Vol. 44. Pp. 50–55.
12. Mamishev A. V. Interdigital dielectrometry sensor design and parameter estimation algorithms for non-destructive materials evaluation. Ph.D. dissertation. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, USA, 1999. 709 p.
13. Huang Y., Zhan Z., Bowler N. Optimization of the coplanar interdigital capacitive sensor. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 36. Pp. 110017-8. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4974695>
14. Mamishev A. V., Sundara-Rajan K., Yang F., Du Y., and Zahn M. Interdigital Sensors and Transducers. *Proceedings of the IEEE*. 2004. Vol. 92. No 5. Pp. 808–845. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.826603>
15. Nassr A. A., Ahmed W.H., El-Dakhakhni W. W. Coplanar capacitive sensors for detecting water intrusion in composite structures. *Measurement Science and Technology*. 2008. Vol. 19. No 7. Pp. 075702–075709. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/7/075702>
16. Yin X., Hutchins D.A., Chen G., Li W., Xu Z. Studies of the factors influencing the imaging performance of the capacitive imaging technique. *NDT & E International*. 2013. Vol. 60. Pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.07.001>
17. Rolando N. A. C., Kerkvliet H. M. M. and Gerard C. M. M. Design and empirical investigation of capacitive humandetectors with opened electrodes. *Measurement Science and Technology*. 2009. Vol. 21, No 1. Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/1/015802>
18. Zhu F., Spronck J.W., Heerens W.C. A simple capacitive displacement sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 1991. Vol. 26. No 1–3. Pp. 265–269. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(91\)87003-L](https://doi.org/10.1016/0924-4247(91)87003-L)
19. Hu X. and Yang W. Planar capacitive sensors – designs and applications. *Sensor Review*. 2010. Vol. 30. No 1. Pp. 24–39. DOI: <https://doi.org/10.1108/02602281011010772>
20. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Berezhnychenko V.O. Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 2. No. 78. Pp. 173–180. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80>
21. Iossel' Yu. Ya., Kochanov E.S., Strunskii M.G. Calculation of Electric Capacitance. Leningrad: Energoizdat, 1981. 288 p. (Rus)
22. Heerens W.C. Multi-terminal capacitor sensors. *Journal of Physics E Scientific Instruments*. Vol.15. 1982. Pp. 137–141. DOI: DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/15/1/027>
23. Levytskyi A.S, Fedorenko G.M. Gruboj O.P. Monitoring of the status of powerful hydro and turbo generators using capacitive meter for the parameters of mechanical defects. IED NANU Publ., 2011. 242 p. (Ukr)