

УДК 621.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.093>

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ФУНКЦІЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ КОМПЛАНАРНОГО ЄМНІСНОГО СЕНСОРА БИТТЯ ВАЛІВ

В.О. Березниченко*, **О.Є. Підчібій****,

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

Наведено результати дослідження методами комп'ютерного моделювання впливу товщини діелектричної підкладки ємнісного сенсора биття, електроди якого виготовлені з фольгованого діелектрика типу FR4, на функцію перетворення сенсора. Дослідження проводились у діапазоні вимірювання сенсора зі зміною товщини діелектрика, вибраної зі стандартної лінійки розмірів матеріалу. Проведено порівняльний аналіз методів виготовлення ємнісних сенсорів із використанням технології друкованих плат. У результаті проведеного аналізу отримано залежності впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення ємнісного сенсора. Бібл. 20, рис. 2, таблиця.

Ключові слова: гідрогенератор, биття вала, ємнісний сенсор, технологічні чинники, комп'ютерне моделювання.

Постановка проблеми. Гідроелектростанції та гідроакумулюючі (ГЕС та ГАЕС) електростанції займають надзвичайно важливе місце в сучасних енергетичних системах, виконуючи головну роль у регулюванні балансів під час нестационарних режимів енергосистеми [1], а також забезпечуючи енергосистему в найбільш нерівномірних частинах графіків навантаження, працюючи як генератори у вранішні та вечірні піки споживання та як споживачі в разі наявності надлишку електроенергії (ГАЕС у насосному режимі).

Однак сучасний стан ГЕС та ГАЕС характеризується зростанням кількості обладнання, яке відпрацювало свій ресурс та вимагає модернізації й заміни. Зважаючи на обмеження у фінансуванні, особливо в період пандемії, треба зауважити, що заміна такої кількості генераторів, які відпрацювали свій ресурс, новими в стислий термін є малоімовірною. Другий шлях вирішення цієї проблеми наразі є більш прийнятним та передбачає визначення фактичного технічного стану енергооб'єктів на основі створення та застосування сучасних засобів отримання поточної та ретроспективної інформації, що може бути використано під час порівняння прогнозованих експлуатаційних показників із поточними значеннями, а також у разі планування міжремонтних інтервалів.

Для оцінювання стану гідроагрегатів як механічної системи зазвичай використовують системи вібраційного контролю [2], до складу яких входять як вимірювачі параметрів вібрації частин гідроагрегатів, так і вимірювачі механічних параметрів, таких як радіальне биття циліндричних поверхонь валу [3–5], повітряний зазор між статором і ротором у генераторі [6–8] тощо [9–13]. Для вимірювання параметрів биття валів у системах технічного діагностування ГЕС та ГАЕС застосовуються спеціалізовані інформаційно-вимірювальні засоби отримання первинної інформації – сенсори. На сьогодні реалізовано безліч сенсорів, але всі вони є вузькоспеціалізованими і здебільшого не можуть використовуватися для вимірювання параметрів биття.

Для розв'язання задачі вимірювання параметрів биття в останні роки все більшу зацікавленість викликають ємнісні сенсори [14, 15], які дають змогу забезпечити безконтактність вимірювання [16], простоту й компактність конструкцій, малий розмір і вагу, здатність функціонувати в широких робочих межах, включно з частотним і температурним діапазонами та невисокою вартістю. Від інших ці сенсори вигідно відрізняються високою чутливістю до переміщень, роздільною здатністю, малим часом спрацьовування, відсутністю гістерезису, малою інерційністю вимірювань, температурною стабільністю, практично повною відсутністю

сигнальних шумів, малим енергоспоживанням і втратами потужності внаслідок самонагрівання, що робить їх кращим варіантом для роботи в процесі діагностування технічного стану складних систем та об'єктів [17], до яких належать потужні гідрогенератори. Особливою перевагою ємнісних сенсорів биття є те, що їхня функція перетворення не залежить від матеріалу валу, його температури та намагніченості, що має місце на реальних гідроагрегатах [12, 18].

Однак метрологічні характеристики ємнісних сенсорів значною мірою залежать від конструктивних параметрів та технологічних процесів, що використовуються під час їхнього виготовлення. Тому виникає необхідність дослідження впливу методів виготовлення та технологічних похибок ємнісних сенсорів на результати вимірювань.

Метою статті є визначення засобами комп'ютерного моделювання характеру впливу технологічної похибки виготовлення ємнісних сенсорів із концентричними компланарними електродами, спричиненої зміною товщини базового матеріалу, на функцію перетворення.

Визначення характеру впливу в роботі проведено як визначення зміни ємності сенсора в діапазоні вимірювання сенсора за різних фіксованих значень товщини діелектричної підкладки сенсора.

Найбільш перспективною для виготовлення сенсорів є технологія друкованих плат. Для виготовлення ємнісних сенсорів за цією технологією використовують субтрактивний та адитивний методи.

За субтрактивного методу на фольгованому діелектрику травленням міді по захисній масці отримують малюнок друкованих електродів.

За адитивного методу на діелектричній основі, вкритій шаром клейкого композиту, проводять вибіркове осадження струмопровідного покриття.

Порівняно з субтрактивним адитивний метод має такі переваги:

- однорідність структури провідників, оскільки провідники й металізовані отвори отримують в єдиному хіміко-гальванічному процесі;
- усунуто підтравлювання елементів друкованого монтажу;
- покращена рівномірність товщини металізованого шару в отворах;
- підвищена щільність друкованого монтажу;
- немає витрат міді та хімікатів для травлення;
- зменшена тривалість виробничого циклу.

Попри описані переваги, застосування адитивного методу в масовому виробництві обмежено низькою продуктивністю процесу хімічної металізації, шкідливим впливом електролітів на діелектрик, труднощами одержання металевих покриттів із хорошою адгезією. Домінуючою в цих умовах є субтрактивна технологія, особливо з переходом на фольговані діелектрики з тонкомірною фольгою.

Оскільки сенсор являє собою багатошарову друковану плату відповідно до міжнародного стандарту друкованих плат ANSI/IPC A-600H [19], можливі варіанти товщини найбільш поширеного базового матеріалу, який використовується як діелектрик (FR4), складає ряд: (0.2; 0.25; 0.36; 0.51; 0.71; 1; 1.5; 2) \pm 0,2 мм. Можливі відхилення в межах допуску, але треба пам'ятати, що кожне відхилення впливає на функцію перетворення. Робоча температура експлуатації цього матеріалу – від -50 до +110 °С, температура склування (розм'якшення) – приблизно 135 °С. Зазвичай FR-4 – напівпрозорий, стандартний зелений колір визначається кольором паяльної маски [20].

Для визначення впливу зміни товщини базового матеріалу на функцію перетворення концентричного компланарного ємнісного сенсора биття валів була створена ідеалізована модель. У створеній моделі товщина діелектричної підкладки змінюється відповідно до значень стандартного ряду товщини базового матеріалу (FR4), які наведені вище, без урахування допусків.

Схему ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами зображено на рис. 1, де H_{foil} – товщина провідного матеріалу (мідної фольги), H_{diel} – товщина діелектричної підкладки, d – відстань до заземленої поверхні валу, h – відстань між електродами.

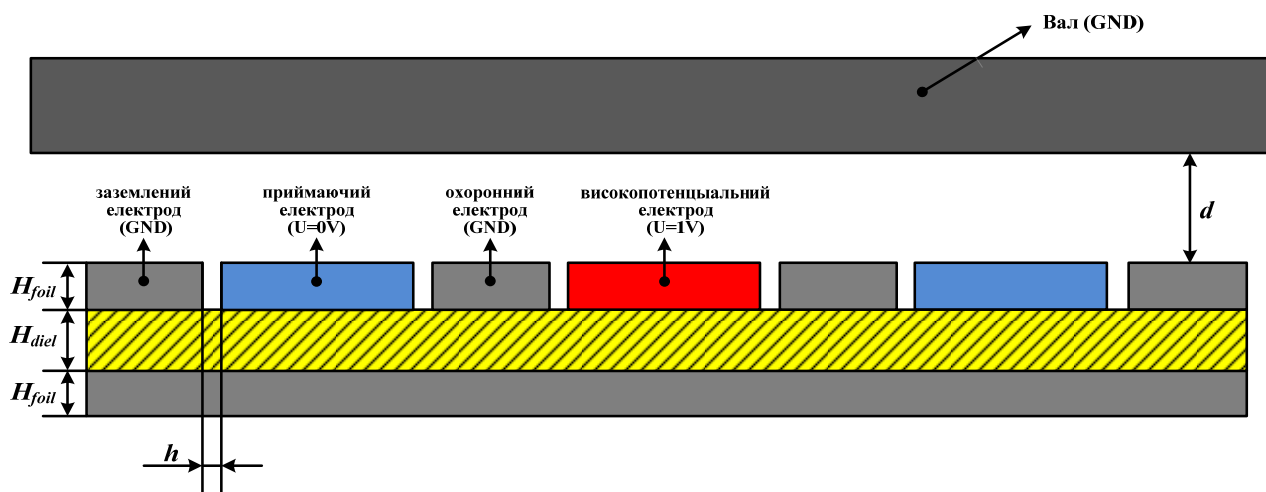


Рис. 1

У моделі, зображеній на рис. 1, змінюється лише товщина діелектричної підкладки H_{diel} , товщини електродів обрані з найбільш розповсюджених, і їхня величина становить $H_{foil} = 18$ мкм, а значення відстані міжелектродного зазору приймається $h=0.1$. Окрім шару діелектрика на зворотну сторону сенсора додається ще один шар мідної фольги.

Результати дослідження наведено в таблиці та на рис. 2. Як видно з результатів проведених досліджень, що зображені на рис. 2 та в таблиці, товщина діелектричної підкладки має прямий вплив на функцію перетворення ємнісного сенсора, тобто зі збільшенням товщини діелектричної підкладки збільшується значення ємності. Залежність збільшення величини ємності від товщини діелектричної підкладки носить адитивний характер. Оскільки у разі використання цифрових засобів як вторинних вимірювальних перетворювачів (ВВП) для перетворення ємності в інформаційний параметр отримані залежності враховуються під час перетворення програмно-математичною частиною ВВП, то основна складова похибки під час здійснення контролю параметрів биття валів буде обумовлюватися саме похибками, які вносяться аналого-цифровою частиною ВВП, лініями з'єднання тощо.

d , мм	$H_{diel}=0.2$	$H_{diel}=0.25$	$H_{diel}=0.36$	$H_{diel}=0.51$	$H_{diel}=0.71$	$H_{diel}=1$	$H_{diel}=1.5$	$H_{diel}=2$
	См, pF							
0.3	0.000006	0.000007	0.000038	0.000316	0.0015	0.0048	0.0129	0.0216
0.4	0.000067	0.000068	0.000099	0.000379	0.0016	0.0049	0.0129	0.0217
0.5	0.0003	0.0003	0.0003	0.0006	0.0018	0.0051	0.0132	0.0219
0.6	0.0007	0.0007	0.0007	0.0010	0.0022	0.0055	0.0136	0.0224
0.7	0.0014	0.0014	0.0014	0.0017	0.0029	0.0062	0.0143	0.0231
0.8	0.0023	0.0023	0.0024	0.0026	0.0038	0.0072	0.0153	0.0240
0.9	0.0034	0.0035	0.0035	0.0038	0.0050	0.0083	0.0164	0.0252
1	0.0048	0.0048	0.0048	0.0051	0.0063	0.0096	0.0177	0.0265
1.1	0.0062	0.0062	0.0063	0.0066	0.0078	0.0111	0.0192	0.0280
1.2	0.0078	0.0078	0.0078	0.0081	0.0093	0.0127	0.0208	0.0295
1.3	0.0094	0.0094	0.0095	0.0098	0.0110	0.0143	0.0224	0.0312
1.4	0.0111	0.0111	0.0112	0.0115	0.0127	0.0160	0.0241	0.0329
1.5	0.0128	0.0128	0.0129	0.0132	0.0144	0.0177	0.0258	0.0346
1.6	0.0145	0.0146	0.0146	0.0150	0.0161	0.0195	0.0276	0.0364
1.7	0.0163	0.0163	0.0164	0.0167	0.0179	0.0212	0.0294	0.0381
1.8	0.0181	0.0181	0.0182	0.0185	0.0197	0.0230	0.0311	0.0399
1.9	0.0198	0.0198	0.0199	0.0202	0.0214	0.0248	0.0329	0.0417
2	0.0215	0.0216	0.0216	0.0220	0.0232	0.0265	0.0346	0.0434
2.1	0.0232	0.0233	0.0234	0.0237	0.0249	0.0282	0.0363	0.0451
2.2	0.0249	0.0250	0.0251	0.0254	0.0266	0.0299	0.0380	0.0468
2.3	0.0266	0.0266	0.0267	0.0270	0.0282	0.0316	0.0397	0.0485

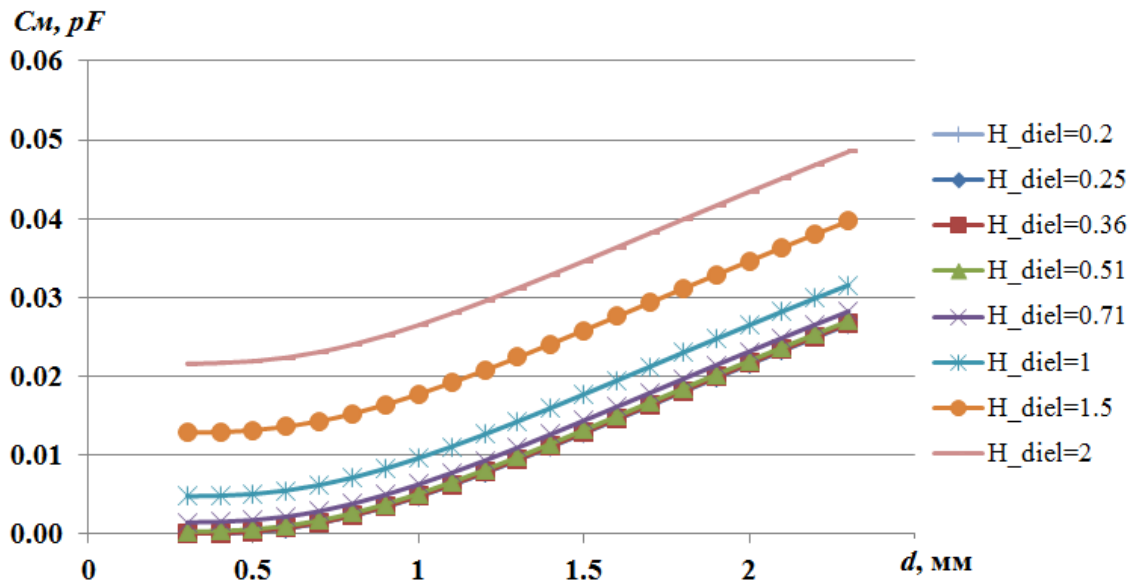


Рис. 2

Висновки. 1. Результати досліджень дають змогу оцінити вплив товщини діелектрика, на якому сформовано електроди ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами, на функцію перетворення сенсора, яка має адитивний характер.

2. Для забезпечення взаємозамінності сенсорів, граничні відхилення сумарних товщин плати сенсора не мають бути більші суми граничних відхилень товщини діелектричної підкладки та шарів провідного матеріалу.

3. Під час проєктування вимірювачів биття валів отримані прямо пропорційні залежності можуть бути використані для лінеаризації робочого діапазону сенсора.

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. Брызгалов В.И., Гордон Л.А. Гидроэлектростанции: Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. 541 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. Зайцев Е.А., Сидорчук В.Е. Оптоэлектронный датчик измерения биения вала турбо- и гидрогенераторов. *Приборостроение-2017: Сборник материалов докладов 10-ой международной научно-технической конференции*. Минск, 01–03 ноября 2017 г. Минск: БНТУ, 2017. С. 366–368.
4. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Березниченко В.О. Особливості вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валу гідроагрегату. *Гідроенергетика України*. 2019. № 1–2. С. 39–44.
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. 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>
7. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромплас Б.А. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі SGK 538/160-70М. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2016. № 43. С. 134–137.
8. Зайцев Е.А., Левицький А.С., Сидорчук В.Е. Система контролю воздушного зазора гидрогенераторов. *Приборы и методы измерений*. 2017. № 8(2). С. 122–130.
9. 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>

10. Левицький А.С., Зайцев Е.А., Кобзарь К.А. Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора. *Приборы и методы измерений*. 2018. № 9 (2). С. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129>.
11. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Смирнова А. М. Пружний елемент перетворювача зусиль в стяжних призмах осердя статора потужного турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. № 49. С. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2018.49.032>
12. Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.
13. Зайцев Є.О. Розвиток теорії і практична реалізація оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Ін-т електродинаміки НАН України. Київ, 2020. 40 с.
14. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Bereznychenko V. Hybrid diagnostics systems for power generators faults: systems design principle and shaft run-out sensors. *Power systems research and operation: Selected Problems*. Springer, 2022. URL: <https://www.springer.com/gp/book/9783030829254#aboutBook> (дата звернення: 21.06.2021).
15. Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Безконтактний ємнісний сенсор системи контролю параметрів биття валів потужних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2020. Вип. 57. С. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.081>.
16. 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..* Intechopen, 2020. 185 p. Pp. 25–42. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.77988>.
17. Сисоева С., Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 11. Ёмкостные датчики – новые игроки автомобильного рынка. *Компоненты и технологии*. 2006. № 4.
18. Lin Jackson, Bissonnette Marc R. A new capacitive proximity probe immune to electrical runout. URL: https://www.marubun.co.jp/legacy/product/measurement/electric/qgc18e000000pefatt/PCS_CMVA.pdf (дата звернення 01.07.2021)
19. ANSI/ IPC-A-600G. Acceptability of Printed Boards. [Released: 2004-07-01]. IPC association connecting electronics industries, Bannockburn, Illinois USA, 2004. 140 p.
20. Яцюк Л.А., Косогін О.В., Ущাপовський Д.Ю., Лінючева О.В., Фатєєв Ю.Ф. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу: Київ. КПІ ім. І. Сікорського, «Політехніка», 2018. 330 с.

ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL FACTORS INFLUENCE ON RESPONSE FUNCTION OF THE COPLANAR CAPACITIVE SHAFT BEATING SENSOR

V. Bereznychenko, O. Pidchibii

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 results of analysis of the influence of the thickness of the dielectric substrate of a capacitive beating sensor, the electrodes of which are made of foil dielectric type FR4, on the transformation function of the sensor by methods of computer modeling are presented. The results of research by methods of computer modeling of the influence of the thickness of the dielectric substrate of a capacitive beating sensor, the electrodes of which are made of foil dielectric type FR4, on the transformation function of the sensor are presented. The studies were performed in the measurement range of the sensor with a change in the thickness of the dielectric selected from a standard line of material sizes. A comparative analysis method for manufacturing capacitive sensors using PCB technology was done. As a result of the analysis, the dependences of the influence of the thickness of the dielectric substrate on the conversion function of the capacitive sensor are obtained. Ref. 20, fig. 2, table.

Keywords: hydrogenerator, shaft beating, capacitive sensor, technological factors, computer simulation.

1. Bryzgalov V.I., Gordon L.A. *Gidroelektrostancii*: Krasnoyarsk: Publishing and Printing Center Krasnoyarsk State Technical University. 2002. 541 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. Zaitsev I.O., Sidorchuk V.E. Optoelectronic sensor for measuring the shaft runout of turbo- and hydrogenerators. *Instrumentation -2017: Collection of materials of reports of the 10th international scientific and technical conference*. Minsk, 01-03 Nov. 2017. Minsk: BNTU, 2017. Pp. 366–368. (Rus)

4. 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)
5. Levitskyi 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. Zaitsev I.O., Levitskyi 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>
7. Levitskyi A.S., Zaitsev Ie.O., Kromplyas B.A. Determination of the response characteristic of the capacitive sensor of the air gap in the hydrogenerator SGK 538/160-70M. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2016. No 43. Pp. 134–137. (Ukr)
8. Zaitsev I.O., Levitskyi A.S., Sydorчук V.E. Air gap control system for hydrogenerators. *Pribory i metody izmerenij*. 2017. Vol. 8. No 2. Pp. 122–130. DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-2-122-130> (Rus)
9. Zaitsev Ie.O., Levitskyi 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>
10. Levitskyi A.S., Zaitsev I.O., Kobzar K.O. Measuring the stroke of cone disk springs in power accumulators of the turbogenerator stator core using a capacitive sensor. *Pribory i metody izmerenij*. 2018, Vol. 9. No 2. Pp. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129> (Rus)
11. Levitskyi A.S., Zaitsev I.O., Smyrnova A.M. Elastic sensitive element for force transducers of the effort in the powerful turbogenerators stator tightening prisms core. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy* 2018. No 49. Pp. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2018.49.032> (Ukr)
12. Levitskyi 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. K.: IED NANU Publ., 2011. 242 p. (Ukr)
13. Zaitsev Ie. Development of theory and practical implementation of optoelectronic systems for diagnosing mechanical parameters of powerful turbo- and hydrogenerators: author's ref. dis. ... cand. tech. Sciences: 05.13.05 / Inst. of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Kyiv, 2020. 40 p. (Ukr)
14. Zaitsev Ie., Levitskyi A., Berezhnychenko V. Hybrid diagnostics systems for power generators faults: systems design principle and shaft run-out sensors. Power systems research and operation: Selected Problems. Springer, 2022. URL: <https://www.springer.com/gp/book/9783030829254#aboutBook> (accessed: 21.06.2021)
15. Berezhnychenko V., Zaitsev Ie. Non-contact capacitive sensor for powerful electrical machine shafts run-out control systems. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy* 2020. Vol. 57. Pp. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.081> (Ukr)
16. Zaitsev Ie., Levitskyi A. Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. Clean Generators - Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators. Intechopen, 2020. 185 p. Pp. 25–42. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.77988>
17. Sysoeva S. Automotive position sensors. Modern technologies and new perspectives. Part 11. Capacitive sensors - new players in the automotive market. *Komponenty i tekhnologii*. 2006. No 4. (Rus)
18. Lin Jackson, Bissonnette Marc R. A new capacitive proximity probe immune to electrical runout. URL: https://www.marubun.co.jp/legacy/product/measurement/electric/qgc18e0000000pef-att/PCS_CMVA.pdf (accessed: 01.07.2021)
19. ANSI/ IPC-A-600G. Acceptability of Printed Boards. [Released: 2004-07-01]. IPC association connecting electronics industries, Bannockburn, Illinois USA, 2004. 140 p.
20. Yatsyuk L.A., Kosogin O.V., Ushchapovskiy D.Yu., Linyucheva O.V., Fatov Yu.F. The technology of applying non-metallic printed and wiring boards for hand-held mounting: handpicker. Kiev. KPI im. I. Sikorskogo, Politehnika, 2018. 330 p.

Надійшла: 06.07.2021

Received: 06.07.2021