

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ОСЕРДЯ СТАТОРА ПОТУЖНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

А.С. Левицький*, докт. техн. наук., **Є.О. Зайцев****, докт. техн. наук., **М.В. Панчик*****
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: levitskiyanatoliymail@gmail.com, zaitsev@i.ua

Запропоновано пристрій для автоматизованого контролю осердя статора потужного турбогенератора під час складання та пресування на заводі-виробнику. Використовуючи цей пристрій визначають місця осердя з ослабленою монолітністю. Для цього в N точках, рівномірно розташованих по перерізу осердя статора, вимірюють питомий тиск пресування спеціальних пластичних елементів, які встановлено в контрольних комірках додаткового натискного кільця пресу, на якому складають осердя. Під час пресування елементи деформуються, і їхня деформація залежить від величини дефекту осердя (зменшення монолітності), в зоні якого вони розташовані. Найменше буде деформована проба, розташована в зоні найбільшої величини дефекту, а найбільше – в зоні, де дефект мінімальний. Тиск вимірюють, використовуючи плоску металеву мембрану з жорстким центром, на якій в вибраних точках розташовано тензорезистори. Показано, що відносні деформації в плоскій мембрані, які вимірюються тензорезисторами, залежать від величини питомого тиску пресування. Визначено аналітичні залежності між відносними радіальними та тангенціальними деформаціями і питомим тиском пресування. Бібл. 20, рис. 5.

Ключові слова: турбогенератор, осердя статора, збирання, пресування, питомий тиск, контрольна комірка, пластичний елемент, мембрана з жорстким центром, тензорезистори.

Вступ. Під час складання на заводі-виробнику осердя статора потужного турбогенератора (ТГ) штамповані і лаковані сегменти з електротехнічної сталі мають бути укладені з порівняно високою точністю та опресовані з однаковою щільністю по всьому об'єму осердя задля забезпечення вібраційної стійкості і заданих електромагнітних характеристик [1]. Осердя складається і пресується окремими частинами висотою 500-600 см. Форма і розміри сегментів активної сталі повинні забезпечити складання осердя статора з заданими зовнішнім і внутрішнім діаметрами, певну геометрію пазів під укладку обмотки і її заклинення, базування зібраного осердя в корпусі статора [2, 3].

Одним із факторів, що визначають якість спресованості осердя, є правильний вибір зусилля пресування, яке для кожного типу ТГ розраховується, виходячи з його технічних характеристик за методикою, яка описана в [1, 4]. Під час складання і пресування осердя через різні технологічні причини (нерівномірність листів по товщині, нерівномірність лакового покриття, тощо) спостерігаються нерівномірності в його стисненні, тобто місцеві зменшення монолітності [5]. Нерівномірності в осерді необхідно ліквідувати. Це здійснюється вставлянням в послаблені місця спеціальних клинів. Але для здійснення ремонту необхідно мати картину місцевих зменшень монолітності осердя в якомога більшій кількості точок, і ці місця слід діагностувати.

Існуючі методи через особливості складання осердя статора на заводі застосувати практично неможливо [6–13].

На Державному підприємстві "Завод"Електроважмаш" (Україна, м. Харків) було розроблено метод виявлення ділянок осердя з ослабленою монолітністю з використанням оцінювання деформації спеціальних проб, які легко деформуються під час пресування, встановлених рівномірно на торцевій поверхні відповідної ділянки осердя [14]. Розміри, форма і матеріал (свинець) проби визначено в результаті заводських експериментів. Було визначено, що після прикладання питомого тиску пресування, деформація проби в окремій точці буде залежати від величини дефекту осердя, в зоні якого вони розташовані: найбільша деформація буде відповідати найменшому дефекту, і навпаки, найменша – найбільшому дефекту. Після пресування частини осердя ручним інструментом вимірювали товщину деформованих проб і визначали місця з послабленою монолітністю. Рівномірне розміщення контрольних проб на торцевій поверхні осердя забезпечується пристроєм, який виконано

© Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М.В., 2021
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-0146-9498> ; ** <https://orcid.org/0000-0003-3303-471X> ;
*** <https://orcid.org/0000-0003-3633-2632>

як додаткове натискне кільце пресу з контрольними комірками, в яких розміщені проби. Метод застосовується під час складання і пресування осердя статора ТГ типу ТГВ-25-2ПТЗ. Недоліком методу є низька продуктивність праці та недостатня достовірність визначення величини дефекту.

Метою роботи є створення пристрою для вимірювання електричним методом питомого тиску пресування в окремій точці осердя статора потужного ТГ під час пресування.

Основна частина. Пристрій, з використанням якого електричним методом може бути вимірний тиск пресування в 45 точках осердя, має вигляд кільця, яке як додатковий елемент встановлюється на торцеву поверхню осердя. В кільці сформовано N контрольних комірок з розрахунку три комірки на один сталевий сегмент осердя. Якщо сегментів п'ятнадцять, то $N = 45$.

Кільце розміщується під натискним кільцем пресу, яке є технологічним оснащенням під час пресування. Схему пресування осердя статора показано на рис. 1, де: 1 – корпус статора ТГ; 2 – осердя статора ТГ; 3 – стяжні призми; 4 – верхнє натискне кільце; 5 – нижнє натискне кільце; 6 – контрольні комірки; 7 – напрямні стержні для з'єднання кільця 4 і кільця 5. Під час пресування тиск пресу p_x діє на осердя статора 2 через кільця 4 і 5. Осердя стискується, і його листи при цьому переміщуються по призмах 3.

Рис. 2 ілюструє розміщення контрольних елементів на нижньому натискному кільці 5, де: 1 – металевий диск; 1.1 – пази для стяжних призм в диску 1; 2 – контрольні комірки; 3 – електронний блок реєстрації та оброблення вимірної інформації; 4 – з'єднувальні кабелі між комірками 2 і блоком 3.

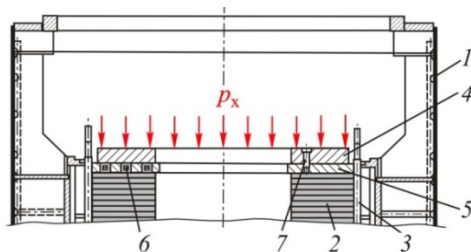


Рис. 1

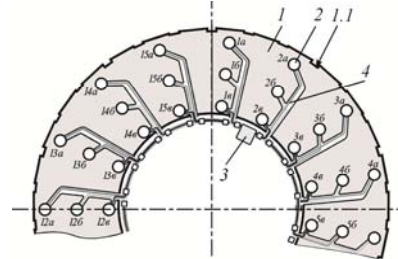


Рис. 2

Схему комірки для автоматичного вимірювання, її конструкцію і принцип дії наведено на рис. 3, де: 1 – осердя статора; 2 – верхнє натискне кільце пресу; 3 – диск нижнього натискного кільця; 4 – стакан; 5 – недеформована свинцева проба; 5.1 – деформована свинцева проба; 6 – втулка; 7 – мембрана з жорстким центром; 8 – тензорезистори. Висота втулки 6 вибрана таким чином, що відстань між верхньою поверхнею втулки 6 і верхньою поверхнею диска 3 приблизно дорівнює товщині проби 5. Ця відстань є однаковою для всіх N стаканів і N втулок. У верхній частині дна стакану 4 сформовано плоску металеву мембрану 7 з жорстким центром, який утворено на протилежній пробі стороні мембрани, 8 – тензорезистори.

В початковий період положення кільць 2, 3 і елементів комірки показано на рис. 3, а і б. Під час пресування осердя питомий тиск пресу p_x через втулку 6 діє на свинцеву пробу 5 і на мембрану 7 (рис.

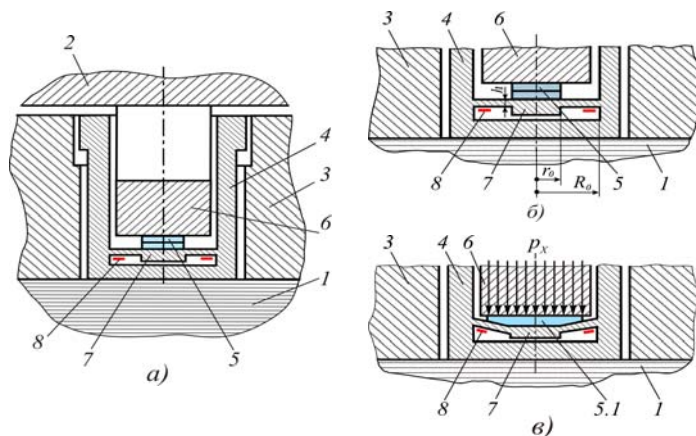


Рис. 3

3, в). Проба буде деформована (поз. 5.1), мембрана 7 прогнеться, в ній виникнуть радіальні σ_r і тангенціальні σ_t напруги і, відповідно, відносні радіальні ε_r і тангенціальні ε_t деформації. Враховуючи те, що мембрана є пластиною, яка симетрична, то в ній по дузі одного радіуса r напруги і відносні деформації будуть однаковими (рис. 4).

Величини деформацій ε_r і ε_t в окремій точці мембрани з радіусом r в області малих переміщень центру мембрани, які залежать від тиску p_x , механічних характеристик матеріалу мембрани та її геометричних розмірів, визначимо як [15–17]

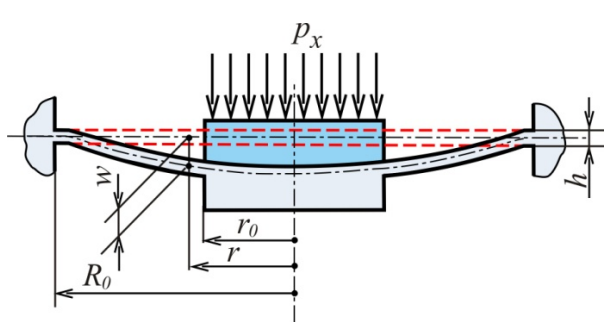


Рис. 4

$$\varepsilon_r = \frac{w}{1-\mu^2} \left[C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{3p_x r^2}{16D} + \mu \left(C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{p_x r^2}{16D} \right) \right], \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{w}{1-\mu^2} \left[C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{p_x r^2}{16D} + \mu \left(C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{3p_x r^2}{16D} \right) \right], \quad (2)$$

$$\text{де } w = A_r \frac{p_x R_0^4}{Eh^3}; \quad A_r = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \cdot \frac{c^4 - 1 - 4c^2 \ln c}{c^4};$$

$$C_1 = -\frac{p_x}{16D} (r_0^2 - R_0^2); \quad C_2 = \frac{p_x}{16D} \cdot \frac{r_0^2 R_0^2 (r_0^2 + R_0^2)}{(R_0^2 - r_0^2)};$$

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$; p_x – питомий тиск пресу; E – модуль пружності матеріалу мембрани; μ – коефіцієнт Пуассона; R_0 – зовнішній радіус мембрани; r_0 – радіус жорсткого центру мембрани; h – товщина мембрани; w – прогин середньої лінії мембрани в точці з радіусом r ; $c = r / r_0$.

Як відомо, відносні деформації поверхні можна виміряти, використовуючи тензорезистори, і зміну їхнього активного опору через зміну навантаження можна визначити за формулами [18–20].

Одним із варіантів розміщення тензорезисторів на мембрані з жорстким центром, за якого забезпечується висока чутливість і лінійність вимірювання відносних деформацій тензометричним мостом з чотирма тензорезисторами [18–20], є розміщення всіх тензорезисторів в зоні заземлення мембрани (рис. 5).

На рис. 5, а показано: 1 – мембрана з жорстким центром; 2 – тензорезистори (для вимірювання відносної радіальної деформації мембрани (R_r)); 3 – тензорезистори для вимірювання відносної тангенціальної деформації мембрани (R_t). Схему включення тензорезисторів в тензометричний міст зображено на рис. 5, б.

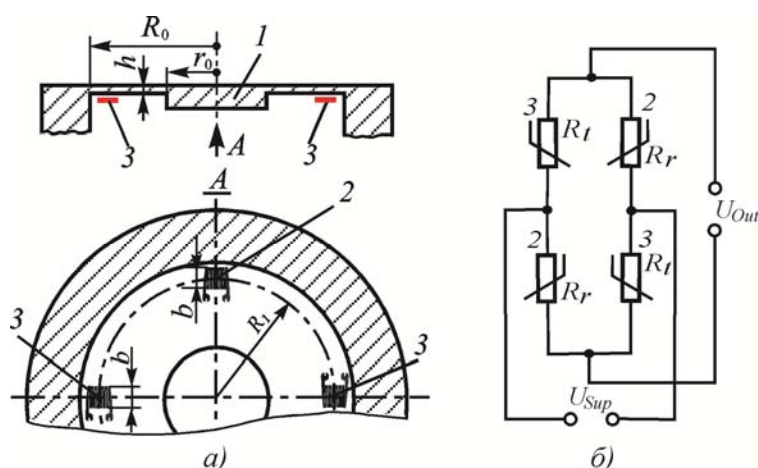


Рис. 5

Відносна радіальна деформація тензорезисторів 2 визначається з використанням формули (1), а відносна тангенціальна – формули (2), де $r = R_1$. Якщо використовуються тензорезистори з базою b , то $R_1 \leq R_0 - b / 2$.

Вимірявши деформації ε_r і ε_t в

зазначених точках мембран, визначають тиск пресування p_x в кожній із N комірок, а враховуючи те, що тиск пресування завдяки нерівномірній монолітності осердя після пресування через наявність дефектів буде різним, можна автоматично визначити місця дефектів та їхню величину.

Висновки. Запропоновано пристрій для автоматизованого контролю осердя статора потужного ТГ під час складання та пресування на заводі-виробнику для виявлення місць осердя зі зменшеною монолітністю. Використовується вимірювання електричним методом питомого тиску пресування в N точках поперечного перерізу осердя, в яких встановлюються контрольні проби, які легко деформуються. Пристрій у вигляді додаткового натискного кільця встановлюється на торцеву поверхню осердя. Створено тензометричний перетворювач питомого тиску пресування, який складається з плоскої вимірювальної мембрани з жорстким центром з нанесеними на ній тензорезисторами. Використання пристрою дає можливість підвищити продуктивність праці під час контролю осердя, з більшою вірогідністю діагностувати його дефекти з подальшим їхнім усуненням і в результаті підвищити надійність електричної машини та її строк експлуатації.

На основі розробленого пристрою може бути створена автоматизована система контролю осердя з відповідним програмним забезпеченням.

Роботу виконано за рахунок коштів бюджетної програми "Інформаційно-вимірювальні системи і метрологічне забезпечення в електроенергетиці" (КПКВК 65411030).

1. Юхимчук В.Д. Технология производства электрических машин. Харків: Тимченко, 2006. 543 с.
2. Patil A., Biswas S. Modeling a virtual prototype of stator core lamination assembly device. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*. 2013. Vol. 1. Issue 10. Pp. 32–35.
3. Geddam P., Barik B.K. Developing a virtual prototype for stacking laminations in stator core of turbogenerator using robot simulation software. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering (JMSME)*. 2015. Vol. 2. No 5. Pp. 456–460.
4. Фомин Б.П., Циханович Б.Г., Виро Г.М. Технология крупного электромашиностроения. Турбогенераторы. Т. 1. Л.: Энергоатомиздат, 1981. 303 с.
5. Зайцев С.О., Панчик М.В. Фізичні процеси та їх вплив на розвиток дефектів в осерді статора потужних генераторів. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2020. Issue 224. Pp. 81–84. DOI: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-20>
6. Пузаков С.Е., Голоднова О.С., Ростик Г.В., Кутуков Л.Г., Завьялов Г.В., Ткачева Л.Н. Справочник по ремонту турбогенераторов. М.: ИПК госслужбы, ВИПКэнерго, 2006. 724 с.
7. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. 152 с.
8. Stator core compressibility test. URL: <https://www.slideshare.net/donaldsatrianistephen/stator-core-compr-test> (accessed 10.06.2020).
9. Григорьев А.В., Семенов Д.Ю., Осотов В.Н., Ямпольский Д.А. Исследование вибромеханических характеристик пакета электротехнической стали и возможностей их использования для контроля прессовки сердечника статора турбогенератора. *Электротехника*. 2003. № 8. С. 36–41.
10. Григорьев А.В., Осотов В. Н., Ямпольский Д. А. Применение параметра поглощения энергии колебаний для контроля прессовки сердечников статоров турбогенераторов. *Электротехника*. 2004. № 11. С. 16–19.
11. Шаронин В.С., Полторадня А.В. Способ диагностики состояния сердечника статора электрической машины. Патент Российской Федерации № 2223587, 2004.
12. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. IEEE 39th International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kiev, Ukraine, April 16 – 18, 2019. Pp. 644–647. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783916>
13. Левицкий 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. Т. 9 (2). С. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129>.
14. Пінської В. Ф., Захожаєв В. М., Шофул А. К., Левицький А.С. Контроль осердя статора потужного турбогенератора під час складання і пресування. *Гідроенергетика України*. 2020. № 1-2. С. 55–58.
15. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981. 392 с.
16. Скворцов П.А. Разработка методики расчета и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре "Кремний на сапфире" :автореф. дис. канд. техн. наук : 01.02.06. Москва, 2019. 20 с.
17. Тиняков Ю.Н., Николанева А.С. О расчете мембран датчиков давления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2015. № 6. С. 135–142. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2015-6-135-142>
18. Бауман Э. Измерение сил электрическими методами. М : Мир, 1978. 430 с.
19. Dan Mihai Stefanescu. Handbook of Force Transducers: Principle and Components. Berlin: Springer, 2011. 612 p. URL: <https://books.google.com.ua/books?id=RjzO10gmXZYC&pg=PR21&lp> (дата звернення 10.06.2020).
20. Guide to the Measurement of Force. The Institute of Measurement and Control, London. Originally published 1998. Reviewed and re-issued. 2013. 46 p. URL: <http://www.npl.co.uk/upload/pdf/forceguide.pdf> (дата звернення 10.06.2020).

AUTOMATED DEVICE FOR MONITORING THE STATOR CORE OF POWERFUL TURBOGENERATOR

A.S. Levytskyi, Ie.O. Zaitsev, M.V. Panchik

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: levitskiyanatoliymail@gmail.com , zaitsev@i.ua

A device for automated control by the stator core of a powerful turbine generator (TG) during assembly and pressing at the manufacturing plant is proposed. Using the device, places in the core with a weakened solidity are determined. For this, at N points evenly spaced along the cross section of the stator core, the specific pressing pressure of special plastic elements, which are installed in the control cells of the additional pressure ring of the press, on which the core is assembled, is measured. During pressing, the elements are deformed, and their deformation depends on the degree of core defect (decrease in solidity) in the zone of which they are located. The sample will be deformed less, located in the

zone of the largest defect, and most of all - in the zone where the defect is minimal. The pressure is measured using a flat metal membrane with a rigid center on which strain gauges are located at selected points. It is shown that the relative deformations in a flat membrane, which are measured by strain gages, depend on the value of the specific pressing pressure. Analytical relationships between the relative radial and tangential deformations and the specific pressing pressure have been determined. References 20, figures 5.

Keywords: turbogenerator, stator core, assembly, pressing, specific pressure, control cell, plastic element, diaphragm with rigid center, strain gages.

1. Yukhimchuk V.D. Technology for the production of electrical machines. Kharkiv: Timchenko, 2006. 543 p. (Rus)
2. Patil A., Biswas S. Modeling a virtual prototype of stator core lamination assembly device. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*. 2013. Vol. 1. Issue10. Pp. 32–35.
3. Geddam P., Barik B.K. Developing a virtual prototype for stacking laminations in stator core of turbogenerator using robot simulation software. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering (JMSME)*. 2015. Vol. 2. No 5. Pp. 456–460.
4. Fomin B.P., Tsikhanovich B.G., Viro G.M. Technology of large electrical machine building. Turbine generators. Vol. 1. Leningrad: Energoatomizdat, 1981. 303 p. (Rus)
5. Zaitsev I.O., Panchik M.V. Physical processes and their influence on the evolution of defects in the powerful generators stator core. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2020. Issue 224. Pp. 81–84. DOI: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-20> (Rus)
6. Puzakov S.E., Golodnova O.S., Rostik G.V., Kutukov L.G., Zavialov G.V., Tkachev L.N. Handbook for the repair of turbine generators. Moskva: IPK gossuzhby, VIPKenergo, 2006. 724 p. (Rus)
7. Alekseev B.A. Determination of the state (diagnostics) of large turbine generators. Moskva: Publishing house NTs ENAS, 2001. 152 p. (Rus)
8. Stator core compressibility test. URL: <https://www.slideshare.net/donaldsatrianistephen/stator-core-compr-test> (accessed 10.06.2020).
9. Grigoriev A.V., Semenov D.Yu., Osotov V.N., Yampolskiy D.A. Investigation of vibromechanical characteristics of a package of electrical steel and the possibilities of their use to control the pressing of the stator core of a turbine generator. *Elektrotehnika*. 2003. No 8. Pp. 36–41. (Rus)
10. Grigoriev A.V., Osotov V.N., Yampolskiy D.A. Application of the vibration energy absorption parameter to control the pressing of stators cores of turbogenerators. *Elektrotehnika*. 2004. No 11. Pp. 16–19. (Rus)
11. Sharonin V.S., Poltoradnia A.V. Method for diagnosing the state of the stator core of an electric machine. Patent RU No 2223587, 2004. (Rus)
12. Zaitsev Ie.O., Levitskiy A.S., Kromplyas B.A. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. IEEE 39th International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kiev, Ukraine, April 16 – 18, 2019. Pp. 644–647. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783916>
13. Levitskiy A.S., Zaitsev Ie.O., Kobzar K.A. Measuring the stroke of cone disk springs in power accumulators of the turbogenerator stator core using a capacitive sensor. *Priory I metody izmereniia*. 2018. Vol. 9 (2). Pp. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129> . (Rus)
14. Pinskoy V.F., Zakhoshaev V.M., Shoful A.K., Levitskiy A.S. Monitoring of the stator of a forced turbine generator for an hour when folding and pressing. *Hydroenergetika Ukrainy*. 2020. No 1-2. Pp. 55–58. (Ukr)
15. Andreeva L.E. Elastic elements of devices. Moskva: Mashinostroenie, 1981. 392 p. (Rus)
16. Skvortsov P.A. Development of a method for calculating and designing an elastic element of a strain gauge on the structure "Silicon on sapphire": author's abstract of cand. tech. Sci. diss.: 01.02.06. Moskva, 2019. 20 p. (Rus)
17. Tinyakov Yu.N., Nikolaneva A.S. On the calculation of pressure sensor membranes. *Vestnik Moskovskoho Gosudarstvennogo Tekhnicheskoho Universiteta im. N.E. Bauman. Ser. Priborostroenie*. 2015. No 6. Pp. 135–142. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2015-6-135-142> (Rus)
18. Bauman E. Measurement of forces by electric methods. Moskva: Mir, 1978. 430 p. (Rus)
19. Dan Mihai Stefanescu. Handbook of Force Transducers: Principle and Components. Berlin: Springer, 2011. 612 p. URL: <https://books.google.com.ua/books?id=RjzO10gmXZYC&pg=PR21&lp> (accessed 10.06.2020).
20. Guide to the Measurement of Force. The Institute of Measurement and Control, London. Originally published 1998. Reviewed and re-issued. 2013. 46 p. URL: <http://www.npl.co.uk/upload/pdf/forceguide.pdf> (accessed 10.06.2020).

Надійшла 22.09.2020
Остаточний варіант 19.04.2021