

ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

УДК 621.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.081>**БЕЗКОНТАКТНИЙ ЄМНІСНИЙ СЕНСОР СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ БИТТЯ ВАЛІВ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН****В.О. Березниченко***, **Є.О. Зайцев****, доктор техн. наукІнститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
e-mail: zaitsevio@nas.gov.ua

У цій статті наведено результати визначення необхідності використання охоронного електрода у вигляді кільця «Кельвіна» для зменшення впливу зовнішніх полів та нерівномірності еквіпотенціальних ліній на функцію перетворення ємнісного сенсора з центральним високопотенційним електродом. Запропоновано розміщення вторинного вимірювального перетворювача в безпосередній близькості до електродів сенсора, що дає змогу усунути необхідність використання тріаксального кабелю між сенсором та вторинним перетворювачем. Сенсор може бути використаний для вимірювання параметрів биття циліндричних поверхонь валів потужних генераторів. Визначено аналітично та методами комп'ютерного моделювання функцію перетворення ємнісного сенсора залежно від відстані між загальною площиною електродів сенсора й заземленою поверхнею валу. Показано доцільність використання засобів комп'ютерного моделювання методами кінцево-елементного аналізу для дослідження метрологічних характеристик сенсорів. Бібл. 21, рис. 4, табл.

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

Постановка проблеми. Значна частина електроенергії в об'єднаній енергетичній системі України виробляється за допомогою потужних генераторів (ПГ), які експлуатуються понад 20 років і потребують модернізації або заміни. З огляду на те, що будь-яка несправність у ПГ призводить до економічних втрат, актуальною є завдання забезпечення безаварійної та надійної їхньої експлуатації. Важливим аспектом вирішення зазначеного завдання є контроль технічного стану ПГ. Для потужних гідроагрегатів зазначений контроль можна здійснити, досліджуючи їхні вібраційні характеристики в різних режимах роботи, як зазначено в [1-5]. З іншого боку, актуальною проблемою контролю є необхідність створення ефективних засобів додаткового вимірювання контрольно-діагностичних параметрів, бо проведення контролю лише за вібраційними параметрами не дає змогу виявити всі можливі дефекти вузлів машини ефективно на 100 %. [1, 6, 7]. Суттєво, що засобом підвищення ефективності визначення дефектів і несправностей обладнання на ранній стадії їхнього розвитку є використання додаткових спеціалізованих вимірювачів контрольно-діагностичних параметрів. Допоміжним параметром в оцінюванні вібраційного стану потужного гідроагрегата є радіальне биття циліндричних поверхонь вала. Зазвичай для вимірювання биття валів використовуються стаціонарно встановлені безконтактні сенсори. Комплексне застосування одночасно отриманих результатів вимірювання вібрації і биття вала в різних режимах роботи дає змогу встановити чинники, що спричинили підвищений вібраційний стан гідроагрегата відповідно до класифікації, проведеної в [8-10].

Метою цієї статті є розгляд особливостей визначення функції перетворення сенсора биття з центральним високопотенційним електродом та охоронним кільцем Кельвіна аналітично та методами комп'ютерного моделювання.

Матеріали і результати досліджень. Серед великої кількості наявних засобів вимірювання биття, безконтактні ємнісні сенсори є кращим рішенням через простоту їхньої конструкції та придатність до використання у внутрішніх середовищах потужних генераторів.

У разі застосування цих сенсорів вимірюється відстань між поверхнею загальної площини електродів сенсора та поверхнею контрольованого вала, яка циклічно змінюється залежно від обертової частоти вала та кратних їй гармонік [2, 11].

Як було показано авторами в [8], переважно для вимірювання биття найбільшого використання набули сенсори, побудовані за класичною конструкцією плоскопаралельного конденсатора.

Для аналітичного визначення функції перетворення сенсора, скористаємося тим, що напруженість електростатичного поля E в плоскопаралельному сенсорі розраховується як

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon S}, \quad (1)$$

де q – заряд конденсатора сенсора; ε – діелектрична проникність діелектрика між пластинами; $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; $S = \pi r^2$ – площа одного електрода сенсора; r – радіус робочої зони електрода сенсора.

Тоді, з огляду на (1), ємність плоскопаралельного конденсатора між електродами сенсора визначається як

$$C = \frac{q}{E \cdot d} \quad (2)$$

де d – відстань між пластинами.

Як видно із виразу (2), ймовірне розсіювання потоку індукції (викривлення еквіпотенціальних ліній) на краях електродів призводить до порушення однорідності поля між ними, тобто до зміни напруженості електростатичного поля E та зміни характеру лінійної залежності заряду сенсора від відстані між його електродами, що так само додає нелінійну систематичну складову до функціональної залежності. Крім того, на значення ємності впливають зовнішні поля, що додаються до електростатичного поля на краях електродів сенсора. На рівномірність еквіпотенціальних ліній електростатичного поля впливають також зовнішні об'єкти, через які поле може замикатися, що призводить до виникнення додаткових випадкових похибок під час вимірювання значення ємності.

Для зменшення впливу "крайових ефектів" сенсора на результат вимірювання необхідно забезпечити рівномірність еквіпотенціальних ліній електростатичного поля.

Підставляючи в (2) (1), дістанемо

$$C = \frac{q}{\frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon S} \cdot d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \quad (3)$$

Отже, як видно із виразу (3), у випадку забезпечення рівномірності поля значення заряду сенсора не впливає на результати вимірювань. Для забезпечення рівномірності поля в такому разі застосовують охоронне кільце «Кельвіна» [12], призначене для мінімізації впливу вище зазначених чинників, яке має аналогічний з активним електродом потенціал

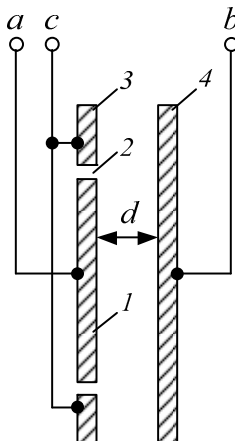


Рис. 1.

напруги й розміщується з ним в одній площині. Для створення охоронного кільця «Кельвіна» в одному з електродів сенсора виділяють електрод у вигляді кола 1. Це – внутрішня частина сенсора, ізолювана від решти пластини невеликим повітряним проміжком 2 (рис.1) та оточена охоронним кільцем 3 (зовнішня частина сенсора).

Вимірювання ємності відбувається у такий спосіб: ємнісний сенсор підключається до вторинного вимірювального перетворювача (ВВП) за трьох- або чотирьох затискною схемою вимірювання так, щоби до робочої частини сенсора входила тільки ємність між внутрішнім колом 1 та електродом 4, захисне ж кільце 3 включається в допоміжну ланку у такий спосіб, щоби потенціал на клеммах "a" та "b" був прямопропорційний ємності (відповідно до виразів (2) та (3)), а на клему "c" подається той же потенціал, що й

на клему "а". За такої схеми вимірювання забезпечується однорідність та паралельність силових ліній біля країв внутрішнього електрода 1. За такого підключення одночасно усувається вплив сторонніх полів і навколишніх предметів на результат вимірювання ємності на відміну від класичної двозатискної схеми без використання охоронного електрода. Перевагою застосування охоронного кільця «Кельвіна» є можливість вимірювання дуже малих значень ємності [13-15]. Зазвичай, описана система електродів у реальних конструкціях оточена кільцевим заземленим електродом.

Одним із недоліків таких сенсорів є необхідність використання тріаксального кабелю між сенсором з охоронним електродом і ВВП. Зазначений вище недолік мінімізується за допомогою усунення такого кабелю через розміщення ВВП у безпосередній близькості до електродів сенсора.

У цьому випадку ВВП забезпечує функцію перетворення значення ємності від зміни відстані до заземленої поверхні контрольованого вала у вихідну напругу у вигляді

$$U(t) = k \frac{C_X(t) - C_{offset}}{C_{ref}} \quad (4)$$

де C_X – значення ємності вимірювального сенсора залежно від зміни відстані до заземленої поверхні контрольованого вала; C_{offset} і C_{ref} – константи, що залежать від схеми вторинного вимірювального перетворювача k – коефіцієнт перетворення ВВП.

Конструктивну схему ємнісного сенсора з вбудованим ВВП показано на рис. 2.

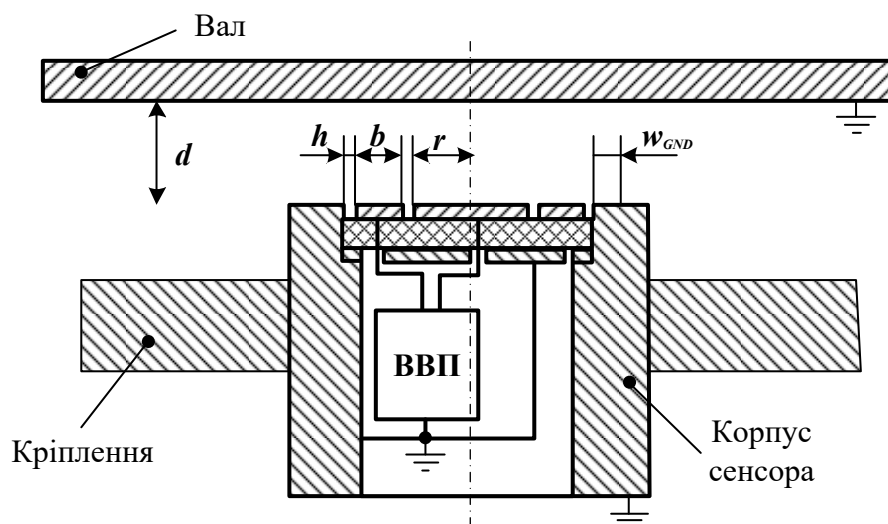


Рис. 2

На рис. 2 введені такі позначення: h – міжелектродний проміжок; b – ширина охоронного кільця «Кельвіна»; r – радіус робочої зони електрода сенсора; w_{GND} – ширина заземленого кільця; d – відстань між пластинами.

Розглянуті датчики биття вала встановлюються на кількох рівнях поблизу вала гідрогенератора, що дає змогу контролювати його биття в декількох перетинах [6, 11, 16-18]. Контроль здійснюють поряд із напрямними підшипниками генератора й турбіни. Встановлюється 4-6 датчиків на агрегат, по 2 датчики під кутом 90° на кожен із підшипників гідроагрегату, бо, окрім генераторного та турбінного підшипника, за значної довжини валу може встановлюватися проміжний підшипник.

Сигнал із виходу сенсора биття з урахуванням формули (4) являє собою модульований сигнал, що описується таким виразом

$$U_{out}(t) = U_{\sigma}(t) \cdot k \cdot U_{Cx}(t) \quad (5)$$

де $U_{\sigma}(t)$ - модулююча функція, яка є сумою гармонічних складових, що відповідають складовим процесу биття вала; $U_{C_x}(t) = (C_x(t) - C_{offset}) / C_{ref}$ - постійна складова напруги на виході ВВП, що є пропорційною ємності C_x .

У якості ВВП для запропонованого ємнісного сенсора доцільним є використання одного з перетворювачів, що описані в [19, 20].

У разі використання ВВП із цифровим виходом матимемо

$$U_{out_n}[i] = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos 2\pi f_n \cdot ni) \cdot k \cdot U_{C_x}[i] \cdot \delta[i] \quad (6)$$

де $\delta[i]$ – функція Дірака [20], a_n – амплітуда n -ої гармонічної складової процесу биття вала, f_n – частота n -ої гармонічної складової процесу биття вала, n – ціле число, i – номер цифрового відліку.

Для реалізації перетворення за виразом (6) на виході ВВП встановлюється АЦП зі швидкодією $2 \cdot f_{max}$ (f_{max} – максимальна частота сигналу, що контролюється системою моніторингу потужних електричних машин).

У таблиці наведено результати визначення значення ємності C_M сенсора, побудованого в програмі Comsol Multiphysics з такими геометричними розмірами: r – 4 мм, b – 4 мм, h – 0,1 мм, w_{GND} – 1,8 мм та аналітичні значення ємності C_C , розраховані за формулою (3), з огляду на те, що площа електродів сенсора визначається як $S = \pi r^2$

Графіки отриманих залежностей $C_M = f(d)$ і $C_C = f(d)$ показано на рис. 3. Для отриманих залежностей знайдемо абсолютну похибку за формулою

$$\Delta C = |C_C - C_M| \quad (7)$$

Таблиця

№ п/п	$d, \text{мм}$	$C_C, 10^{-12} \text{Ф}$	$C_M, 10^{-12} \text{Ф}$	$\Delta C, 10^{-12} \text{Ф}$
1	0,3	1,48	1,52	0,04
2	0,4	1,11	1,14	0,03
3	0,5	0,89	0,91	0,02
4	0,6	0,74	0,76	0,02
5	0,7	0,64	0,65	0,01
6	0,8	0,56	0,57	0,01
7	0,9	0,49	0,51	0,02
8	1	0,45	0,46	0,01
9	1,1	0,40	0,41	0,01
10	1,2	0,37	0,38	0,01
11	1,3	0,34	0,35	0,01
12	1,4	0,32	0,33	0,01
13	1,5	0,30	0,30	0,00
14	1,6	0,28	0,29	0,01
15	1,7	0,26	0,27	0,01
16	1,8	0,25	0,25	0,00
17	1,9	0,23	0,24	0,01
18	2	0,22	0,23	0,01
19	2,1	0,21	0,22	0,01
20	2,2	0,20	0,21	0,01
21	2,3	0,19	0,20	0,01

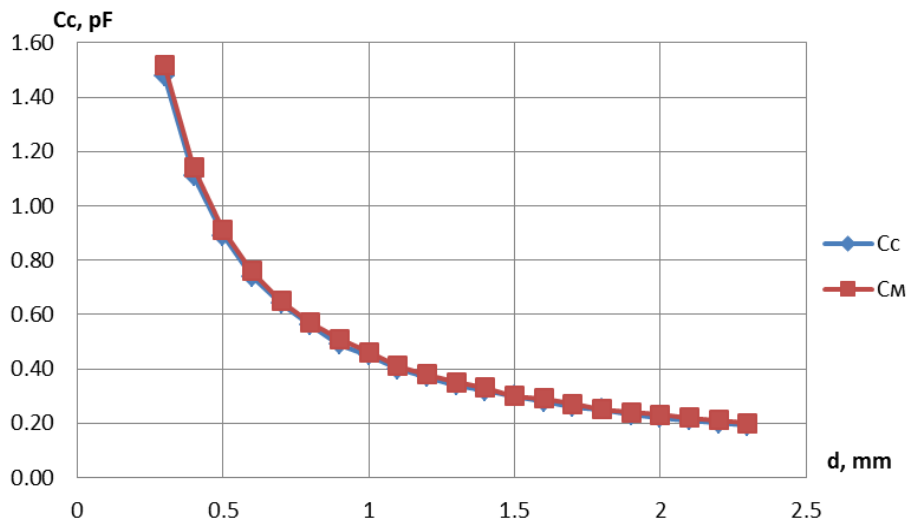


Рис. 3

На рис. 4 наведено графік абсолютної похибки. Похибка зумовлена нехтуванням ширини охоронного електрода під час розрахунку значення ємності аналітичним способом. Під час розрахунків ширина електрода приймалася нескінченно великою.

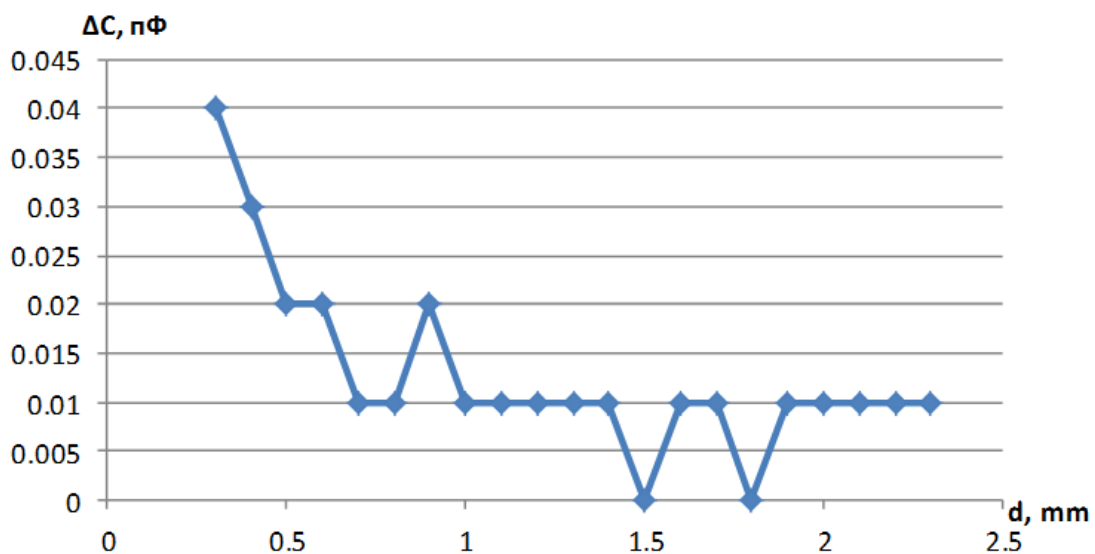


Рис. 4

Висновки.

1. Було розглянуто аналітичне визначення функції перетворення сенсора біття з центральним високопотенційним електродом та охоронним кільцем Кельвіна.
2. Результати проведених досліджень свідчать про те, що розроблена модель сенсора в середовищі мультифізичного моделювання Comsol Multiphysics може бути використана для визначення функції перетворення сенсора та інших метрологічних характеристик. Тому для проведення більш детальних досліджень доцільним є використання середовища мультифізичного моделювання Comsol Multiphysics.
3. Отримано функціональні залежності у разі використання ємнісного сенсора з ВВП.

Фінансується за держбюджетною темою «Створення ємнісних вимірювачів зусиль у стяжних призмах осердя статора потужного турбогенератора» (шифр «Контроль-М»), що виконується за Постановою Бюро ВФПЕ 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. № 2. 144 с.
2. Белоглазов А.В. Разработка адаптивных средств выявления неисправностей и стратегии обслуживания гидрогенераторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02/ Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск. 2011. 22 с.
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. 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.
4. ISO 13381-1:2015. Condition monitoring and diagnostics of machines . Prognosis .Part 1: General guidelines. Released: 2015-09. ISO/TC 108/SC 5 Condition monitoring and diagnostics of machine systems, 2015. 21p.
5. 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.
6. 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.
7. Ишметьев Е.Н., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Бодров Е.Э. Система автоматического построения орбиты вала в подшипнике скольжения. *Современные научные исследования и инновации*. 2017. № 5. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2017/05/82682> (дата звернення: 14.01.2018).
8. 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.
9. Зайцев Є.О., Березниченко В.О. Система контролю биття валів потужних генераторів: дефекти та їх прояви в залежності від механічних сил. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020): Матеріали XIII міжнародної конференції*. Вінниця, ВНТУ. 8–10 жовтня 2020.
10. Иванченко И.П., Прокопенко А.Н., Смелков Л.Л. Техническая система диагностики гидроагрегата разработки «НПО ЦКТИ». НРЭ. 2010. № 12. С. 27–38.
11. Белоглазов А.В. Глазырин Г.В. Разработка средств мониторинга биений вала гидроагрегата. *Сборник научных трудов НГТУ*. 2008. № 3(53). С. 79–84.
12. Нестеренко А.Д. Введение в теоретическую электротехнику. К.: Наукова думка. 1969. 352 с.
13. Вахтер L. K. Capacitive Sensors: Design and Applications. Wiley-IEEE Press, 1996. 320 p.
14. Baikie. D., Venderbosch E., Meyer J. A., Estrup P. J. Z., Analysis of stray capacitance in the kelvin method, *Review of Scientific Instruments*. 1991. Vol. 62. No 3. Pp. 725–735.
15. Webster J. G. The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. CRC Press-IEEE Press, 1999. 2630 p.
16. XY Measurements for Radial Position and Dynamic Motion in Hydro Turbine Generators. *Orbit*. 2010. Vol. 30. No 1. Pp. 32–39.
17. Ungureanu G., Covaciu F., Balaj A., Ciulbea C. Vibration monitoring system of hydro electric turbine-generator sets. Proc. 2002 IEEE-TTTC International Conference on *Automation, Quality and Testing, Robotics*. Vol. 11, Cluj-Napoca, Romania, May 23-25, 2002. Pp. 382–385.
18. Школьник В.Э. Измерение радиального биения цилиндрических поверхностей вала ротора электрических машин. *Сборник «Электросила»*. 2001. № 40. С. 60–66.
19. Новик А.И., Левицький А.С., Неболюбов Е.Ю. Контроль воздушного зазора в мощных гидрогенераторах в процессе эксплуатации. *Технічна електродинаміка*. 2009. №6. С.66–69.
20. Lijun Xu, Shijie Sun, Zhang Cao, Wuqiang Yang. Performance analysis of a digital capacitance measuring circuit. *Review of scientific instruments*. 2015. No 86. Pp. 054703-1-054703-11.
21. Бабак В. П. и др. Теоретические основы информационно-измерительных систем. Киев, 2014. 832 с.

УДК 621.3

БЕСКОНТАКТНЫЙ ЁМКОСТНОЙ СЕНСОР СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ БИЕНИЯ ВАЛОВ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В.А. Березниченко, Е.А. Зайцев, доктор. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,
e-mail: zaitsevio@nas.gov.ua

В данной статье приведены результаты определения необходимости использования охранного электрода в виде кольца «Кельвина» для уменьшения влияния внешних полей и неравномерности эквипотенциальных линий на функцию преобразования емкостного сенсора с центральным высокопотенциальным электродом. Предложено размещение вторичного измерительного преобразователя в непосредственной близости к электродам сенсора, что позволяет устранить необходимость использования триаксиального кабеля между сенсором и вторичным преобразователем. Сенсор может быть использован для измерения параметров биения цилиндрических поверхностей валов мощных генераторов. Определена аналитически и методами компьютерного моделирования функция преобразования емкостного сенсора в зависимости от расстояния между общей плоскостью электродов сенсора и заземленной поверхностью вала. Продемонстрировано целесообразность использования средств компьютерного моделирования методами конечно-элементного анализа для исследования метрологических характеристик сенсоров. Библ. 21, рис. 4, табл.

Ключевые слова: генератор, функциональное состояние, вибрация, сенсор, бесконтактный, компьютерное моделирование.

CONTACTLESS CAPACITIVE SENSOR OF THE SYSTEM FOR MONITORING THE PARAMETERS OF THE BEATING OF THE POWERFUL ELECTRICAL MACHINES SHAFTS

V.O. Berezhnychenko, I.O. Zaitsev

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

In this paper presents the results of the definition the need to use a Kelvin guard ring to reduce the impact of external fields and non-uniformity of equipotential lines to change response characteristic of the capacitive sensor with a central high-potential electrode and a Kelvin guard ring. Measuring transducer placing in the immediate vicinity of the electrodes of the sensor, which eliminates the need to use a triaxial cable, was proposed. The sensor is designed to measure powerful generators shafts cylindrical surfaces parameters run-out. Capacitive sensor response characteristic function which depending on distance between the general plane of electrodes of the sensor and the grounded surface of a shaft is determined analytically and by computer simulation methods. The expediency of using computer modeling tools by finite element analysis methods for studying the metrological characteristics of sensors was shown. References 21, fig. 4, table.

Keywords: generator, functional condition, vibration sensor, non-contact, computer simulation.

1. Alekseev B.A. Determining the status (diagnostics) of large hydro generators. ENAS, 2002. 144 p. (Rus).
2. Beloglazov A.V. Development of adaptive tools for fault diagnostics and strategies for servicing hydrogenerators: author. dis. ... Cand. tech. Sciences: 05.14.02 *Novosibirsk State Technical University*. Novosibirsk. 2011. 22 p. (Rus)
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. 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.
4. ISO 13381-1:2015. Condition monitoring and diagnostics of machines. Prognosis Part 1: General guidelines. Released: 2015-09. ISO/TC 108/SC 5 Condition monitoring and diagnostics of machine systems, 2015. 21p.
5. 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.
6. 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).
7. Ishmetyev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E. System for automatic construction of the shaft orbit in a plain bearing. Modern scientific research and innovation. 2017. No 5. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2017/05/82682> (accessed: 04.11.2020). (Rus)
8. Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Berezhnychenko V.O. Relative and absolute radial vibration of the shaft of the vertical unit. *Hydropower Ukraine*.2019. No. 3-4. Pp. 36–39. (Ukr).
9. Zaitsev I.O., Berezhnychenko V.O. Powerful generators run-out shaft control system: defects and their manifestations depending on mechanical forces. Proc. of the XIII International Conference on *Control and management in complex systems (KUSS-2020)*. Vinnytsia, 8–10 October 2020. (Ukr).
10. Ivanchenko I.P., Prokopenko A.N., Smelkov L.L. Technical diagnostics system for hydroelectric unit by NPO CKTI development . NRE. 2010. No 12. Pp. 27–38. (Rus)
11. Beloglazov A.V. Glazyrin G.V. Development of means for monitoring hydraulic unit run-out shaft. *Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*. 2008. No 3(53). Pp. 79–84. (Rus)
12. Nesterenko A.D. Introduction to theoretical electrical engineering. Kyiv: Naukova dumka, 1969. 352 p. (Rus)
13. Baxter L. K. Capacitive Sensors: Design and Applications. Wiley-IEEE Press, 1996. 320 p.

14. Baikie. D., Venderbosch E., Meyer J. A., Estrup P. J. Z., Analysis of stray capacitance in the kelvin method, *Review of Scientific Instruments*. 1991. Vol. 62, No 3. Pp. 725–735.
15. Webster J. G. The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. CRC Press-IEEE Press, 1999. 2630 p.
16. XY Measurements for Radial Position and Dynamic Motion in Hydro Turbine Generators. *Orbit*. 2010. Vol. 30, No 1. Pp. 32–39.
17. Ungureanu G., Covaciu F., Balaj A., Ciulbea C. Vibration monitoring system of hydro electric turbine-generator sets. Proc. 2002 IEEE-TTTC International Conference on *Automation, Quality and Testing, Robotics*. Cluj-Napoca, Romania, May 23-25 2002. Vol. 11. Pp. 382–385.
18. Shkolnik V.E. Measurement of the radial run-out of the cylindrical surfaces of the rotor shaft of electrical machines. *Scientific Papers of the Electrosila*. 2001. No 40. Pp. 60–66. (Rus)
19. Novik A.I., Levytskyi A.S., Nebolyubov E.Yu. Air gap control in powerful hydrogenerators during operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2009. No 6. Pp.66–69. (Rus)
20. Lijun Xu, Shijie Sun, Zhang Cao, Wuqiang Yang. Performance analysis of a digital capacitance measuring circuit. *Review of scientific instruments*. 2015. No 86. Pp. 054703-1-054703-11.
21. Babak V.P. and other Theoretical bases of information-measuring systems. Kyiv, 2014. 832 p. (Rus)

Надійшла: 11.11.2020

Received: 11.11.2020