

УДК 681.586.722

Є.О. ЗАЙЦЕВ, А.С. ЛЕВИЦЬКИЙ, Б.А. КРОМПЛЯС

Інститут електродинаміки НАН України, Київ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ ДЛЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ МЕТОДАМИ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ

У даній статті наведено результати експериментальних досліджень ємнісного сенсора з компланарними паралельними електродами, призначеного для вимірювання повітряного зазору між статором та ротором в капсульному гідрогенераторі типу СГК538/160-70М. Розроблено методику експериментального дослідження дослідного зразка сенсора. В результаті теоретичних досліджень на основі методів регресійного аналізу отримана функціональна залежність ємності сенсора від експериментально заданого значення зазору, який моделює зміну відстані між полюсом ротора та розточенням осердя статора в гідрогенераторі СГК538/160-70М. Проведена оцінка похибок апроксимуючих функціональних залежностей. Показано, що найменшу похибку забезпечує використання поліномів 3-4-го порядку.

Ключові слова: гідрогенератор, повітряний зазор, ємнісний сенсор, функція перетворення, регресійний аналіз.

I.O. ZAITSEV, A.S. LEVYTSKYI, B.A. KROMPLYAS

Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH OF CAPACITIVE SENSOR FOR MEASUREMENT AIR GAP HYDRO-GENERATORS BASED ON REGRESSION ANALYSIS

This paper is present the result of experimental research of capacitive sensor with coplanar parallel electrodes. The sensor is designed for use to measure the air gap between the stator and rotor in capsular hydro-generators type SGK 538/160-70M. Developed technique for experimental study capacitive sensor shown in paper. Result of experimental studies was a calculated functional relationship for capacitive sensor. These relationships show a change in the sensor capacitance by change of the air gap in the hydro-generator. Value gap was simulates as the change of the distance between the rotor pole and the reboring of the stator core at hydro-generators type SGK 538/160-70M. The relationships are calculated with application of regression analysis methods. It estimates the error caused by using the calculated relationships. Shown that the ensures the the lowest error using 3-4-th order polynomials model.

Keywords: hydro generators, air gap, capacitive sensor, transfer function, regression analysis.

Вступ

Одним із найбільш екологічно чистим джерелом електричної енергії сучасного електроенергетичного комплексу України є потужні гідрогенератори. Забезпечення безперебійного функціонування гідрогенераторів неможливе без постійного або епізодичного контролю їх технічного стану. Проведення контролю вузлів гідрогенераторів дозволяє здійснювати його безпечною роботою протягом всього нормованого терміну експлуатації та при технічній можливості продовжити цей термін [1].

Однією з умов безперебійної та надійної роботи гідрогенераторів сучасних засобів інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) для гідрогенераторів. При цьому контролюються характеристики повітряного зазору між статором й ротором, а також форма зазору.

Забезпечити стабільну та рівномірну величину повітряного зазору при експлуатації складно, особливо за умови невеликої величини повітряного зазору в порівнянні з діаметром розточення статора. Під час роботи гідрогенератора відхилення зазору від номінальних значень виникає внаслідок спотворення форми ротора та осердя статора. Відповідно до інструкції по експлуатації та ремонту гідрогенераторів асиметрія повітряного зазору визначається відхиленням зазорів у діаметрально протилежних точках, як напівсума цих зазорів [2]. Як зазначено в [2], повітряні зазори між ротором та статором генератора в діаметрально протилежних точках повинні відрізнятись один від одного для турбогенераторів з безпосереднім охолодженням провідників потужністю 150 МВт і більше не більше, ніж на 5% від їх середнього значення; 10% – у інших турбогенераторів; 20% – у гідрогенераторів (якщо заводськими інструкціями не передбачені більш жорсткі норми). Все це викликає необхідність автоматичного вимірювання зазору як в процесі експлуатації, так і під час планових оглядів та і ремонтів.

Найпоширенішим методом вимірювання зазору в потужних гідрогенераторах на даний час є ємнісний [3–7]. При використанні зазначеного метода ємнісні сенсори встановлюються на розточенні осердя статора, як зображено на рис.1.а, на якому введено наступні позначення: 1 – ємнісний сенсор; 2 – зубець осердя статора; 3 – полюс ротора). Електрична ємність встановленого сенсору (рис.1.а) залежить від величини повітряного зазору, тобто між відстані між обвідною полюсів ротора та поверхнею розточення осердя статора гідрогенератора (рис.1.б). На рис.1. наведено загальний вигляд капсульного гідрогенератора типу СГК538/160-70М, у якого для достовірного контролю зазору встановлено чотири сенсори ємнісного типу (по два з кожної сторони осердя). Наявність встановлених сенсорів дозволяє проводити контроль значенню величини повітряного зазору в гідрогенераторі. В умовах сьогодення є актуальним розробка спеціалізованих ємнісних сенсорів повітряного зазору для гідрогенераторів, адже для здійснення контролю

повітряного зазору в потужних генераторах необхідні високоєфективні прилади, розроблені з урахуванням конструктивних особливостей машини. Для забезпечення такої розробки необхідною умовою є визначення функціональних залежностей ємнісних сенсорів.

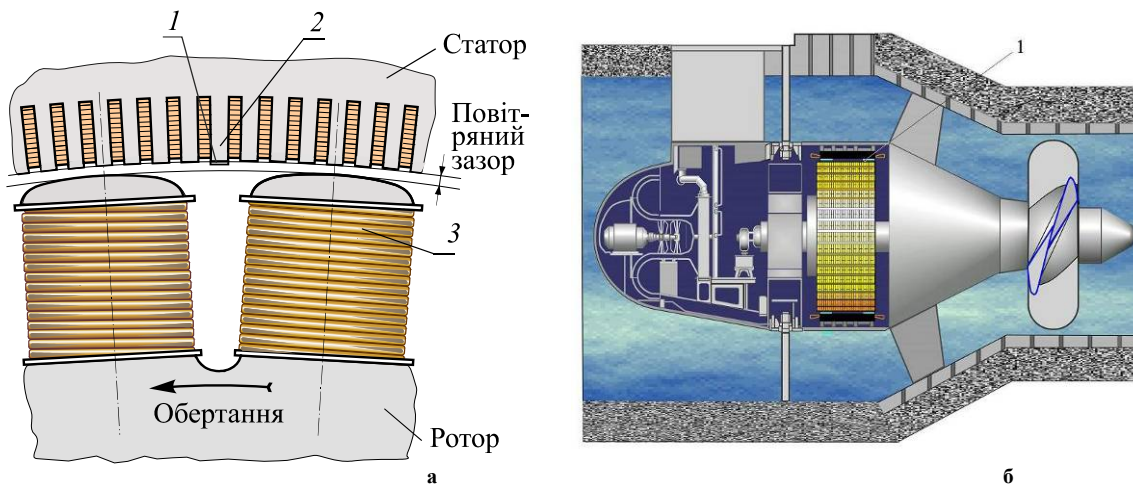


Рис. 1. Конструктивно-технологічні елементи гідрогенератору типу SGK538/160–70М

Мета статті

Метою даної роботи є теоретичне визначення методами регресійного аналізу функціональної залежності експериментально отриманих значень ємності компланарного ємнісного сенсора від дослідно заданого значення повітряного зазору між площиною електродів сенсора та площиною, що імітує заземлену поверхню полюса ротора капсульного гідрогенератора типу SGK538/160–70М.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розгляду питань вимірювання повітряного зазору в потужних генераторах присвячені публікації закордонних та вітчизняних дослідників. Так в роботах [8-13] розглядаються окремі аспекти аналітичних розрахунків, розробки та реалізації спеціалізованих сенсорів для вимірювання повітряного зазору в потужних гідрогенераторах. Так в роботі [8] автори приводять відомий механічний спосіб вимірювання повітряного зазору в гідрогенераторах. Описаний авторами спосіб вимірювання проводиться клиновим розсувним вимірювачем. Недоліком цього способу є його велика трудомісткість. До того ж, слід зазначити, що механічний спосіб вимірювання повітряного зазору розсувним вимірювачем не може забезпечити високу точність вимірювання, оскільки активне залізо статора і полюс ротора мають криволінійну форму з різними радіусами кривизни. Робота [9] присвячена розгляду побудови волоконно-оптичної системи вимірювання зазору з використанням волоконно-оптичного сенсора з пасивним відбивачем. Розглянута система призначена для точних вимірювань та аналізу динамічних змін повітряного зазору у великих гідрогенераторах. У системі використовується пасивний волоконно-оптичний сенсор принцип дії, якого базується на використанні пучка світлових променів волокон, який перебивається спеціальною непрозорою пластинкою в залежності від значення повітряного зазору. Зміна загальної інтенсивності світла слугує інформацією про зміну величини зазору. До недоліків варто віднести складність монтажу системи на роторі та складність виведення сигналу від рухомого ротора. Окрім того при роботі системи неприпустимою є наявність пилу та абразивних часток зношення в головці сенсора, що викликає необхідність її періодичного очищення.

У роботах [10,11] запропоновано ультразвуковий метод вимірювання повітряного зазору. Методу полягає в тому, що з встановленого на роторі (або на статорі) випромінювача в напрямку статора (або ротора) випромінюється ультразвуковий сигнал, який відбивається від статора (або ротора) і фіксується приймачем, розміщеним в одному блоці з випромінювальним пристроєм. Значення повітряного зазору між ротором та статором в цьому випадку вимірюється як сумарний час проходження "туди-назад" зонду чого звукового сигналу з урахуванням швидкості звуку та швидкості обертання ротора. Недоліками методу – є низька точність вимірювання (2–3%) через спотворення звукового сигналу в працюючій машині, а також складність реалізації системи передачі інформаційного сигналу з ротора, що обертається.

В [12] розглянуто реалізацію ємнісного способу вимірювання повітряного зазору, в якому вимірювання інформативної ємності здійснюється між високопотенціальним електродом ємнісного сенсора, який розміщений на розточенні осердя статора, і поверхню полюса ротора генератора. При цьому, для отримання рівномірного електричного поля в зазорі сенсора навколо працюючого високопотенціального електрода розміщується охоронний електрод з потенціалом рівним потенціалу працюючого електрода, але при цьому електроди гальванічно не з'єднані. Недоліком способу є складність схеми вимірювального вторинного перетворювача, до складу якого входить спеціальний трансформатор з обмоткою, виконаною екранованим радіочастотним кабелем, і спеціальний триаксальний кабель. В роботі [13] розглянуто ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору між двома металевими об'єктами (наприклад,

поверхнею розточення осердя статора і полюсом ротора в генераторі), що містить передавальний (високопотенціальний), приймальний (низькопотенціальний) та додатковий металеві електроди, які розташовані в одній площині і закріплені через діелектричну прокладку на розточенні осердя статора. Додатковий електрод розташований навколо високопотенціального та низькопотенціального електродів. Потенціал додаткового електрода рівний потенціалу низькопотенціального електрода (тобто нулю) для зниження впливу крайових ефектів. Недоліком запропонованого сенсору є звужений діапазон вимірювання через малу відстань між високопотенціальним та низькопотенціальним електродами.

Тобто більшість відомих сьогодні методів, що описані в розглянутих вище роботах [1, 8-13], мають істотні недоліки при їх практичному застосуванні для моніторингу стану повітряного зазору між ротором та статором капсульного гідрогенератора типу СГК538/160–70М. Тому для здійснення контролю повітряного зазору авторами в роботі [14] для вимірювання повітряного зазору запропоновано ємнісний сенсор з двома робочими компланарними паралельними електродами з розширеним робочим діапазон вимірювання повітряного зазору.

Вирішення проблеми

Одним із перспективних напрямків вдосконалення роботи моніторингових систем повітряного зазору в капсульних гідрогенераторах типу СГК538/160–70М є використання сенсорів, що адаптовані до умов експлуатації та конструктивних особливостей генератора. Використання таких сенсорів, як джерел первинної інформації дозволяє підвищити якість роботи ІВС та систем автоматичного керування роботою такого складного електротехнічного електрообладнання, як гідрогенератори. Загальний вигляд ІВС з використанням запропонованого в [14] авторами компланарного ємнісного сенсору повітряного зазору зображена на рис.2

На блок-схемі(рис.2) прийняті наступні позначення: $C_1...C_n$ – ємнісні сенсори повітряного зазору між статором та ротором; ПСК – перетворювач ємнісний код; БПСК - блок ПСК; ППЗД - пристрій перетворення та збору даних; БКІВЗ - блок керування та інформаційно-вимірювального забезпечення; ПМЗ - програмно-математичні засоби.

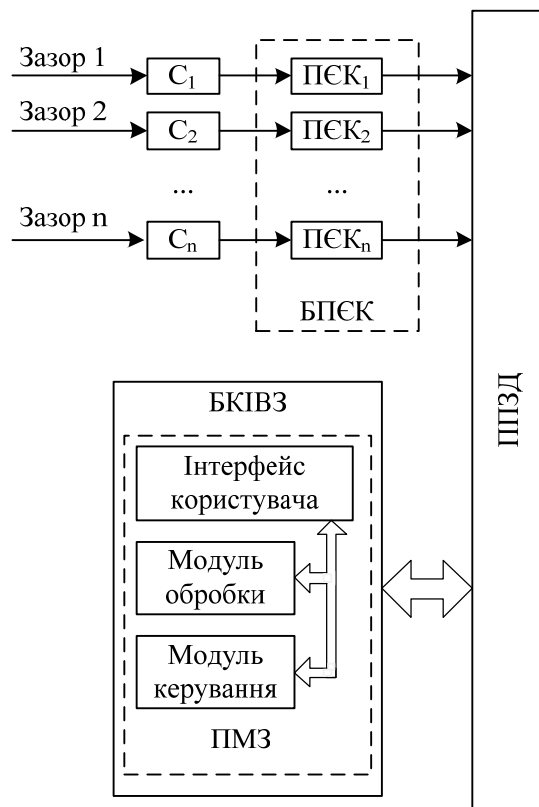


Рис. 2. Блок-схема ІВС повітряного зазору гідрогенератора

На блок-схемі(рис.2) прийняті наступні позначення: $C_1...C_n$ – ємнісні сенсори повітряного зазору між статором та ротором; ПСК – перетворювач ємнісний код; БПСК - блок ПСК; ППЗД - пристрій перетворення та збору даних; БКІВЗ - блок керування та інформаційно-вимірювального забезпечення; ПМЗ - програмно-математичні засоби.

В якості сенсору повітряного зазору в ІВС використовується ємнісний сенсор з двома робочими компланарними паралельними електродами. Конструктивна схема ємнісного сенсору, що була раніше запропонована авторами в роботі [14] зображена на рис.3., на якому введено наступні позначення: 1, 2 – паралельні електроди; 3 – охоронний електрод. Принцип дії ємнісного сенсору полягає в зміні електричної ємності між електродами 1 і 2 від зміни величини повітряного зазору між поверхнями ротора та статора в гідрогенераторі. Для визначення функціональних залежності зміни ємності сенсору від значення повітряного зазору між ротором та статором в гідрогенераторі була використана схема приведена на рис.4, на якій: 1 – заземлена пластина, що імітує полюс ротора гідрогенератора, 2 – пластина, на якій сформовані електроди сенсора, 3 – міст змінного струму P5083.

В процесі випробування мостом змінного струму типу P5083 вимірювалась електрична ємність C_{12} між електродами 1 і 2 (рис. 3) під час зміни зазору d за допомогою мікрометричної головки в діапазоні від 2 до 10 мм. В результаті проведеного експериментального дослідження було отримано 20 базових точок для розрахунку експериментальної

функціональної залежності значення ємності від значення повітряного зазору.

Для вирішення задачі визначення функціональної залежності ємнісного сенсора повітряного зазору скористаємося методами, заснованими на регресійному аналізі експериментально отриманих даних $x[n]$. При цьому завданням є отримання функціональної залежності $C_{12}[n]$, яка апроксимує експериментально отриману залежність $x[n]$ і мінімізує функціонал виду:

$$Q = \sum_{i=1}^n (C_{12}[n] - x[n])^2 \rightarrow \min \tag{1}$$

У цьому випадку функція $C_{12}[n]$ описує криву, яка повторює графік отриманої експериментальної

послідовності $x[n]$. Одним з його найбільш широко застосовуваних на практиці алгоритмів побудови функціональної залежності $C_{12}[n]$ є метод найменших квадратів [15]. В даному випадку для апроксимації виразу $C_{12}[n]$ використовується залежність наступного виду:

$$C_{12}[n] = bc_0[n] + b_1c_1[n] + \dots + b_m c_m[n] \tag{2}$$

де $c_0[n], \dots, c_m[n]$ – довільні базисні функції; b_0, \dots, b_m – невідомі коефіцієнти регресії; m – кількість базисних функцій. Кількість базисних функцій має бути меншою за кількість заданих точок апроксимації для того, щоб їх суперпозиція визначалася одним єдиним чином.

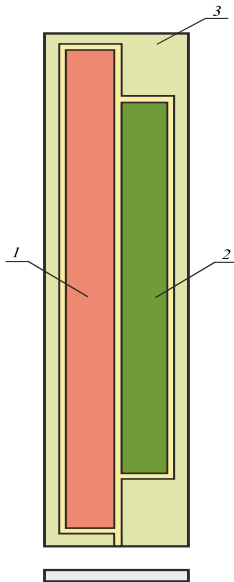


Рис. 3. Конструктивна схема смісного сенсору

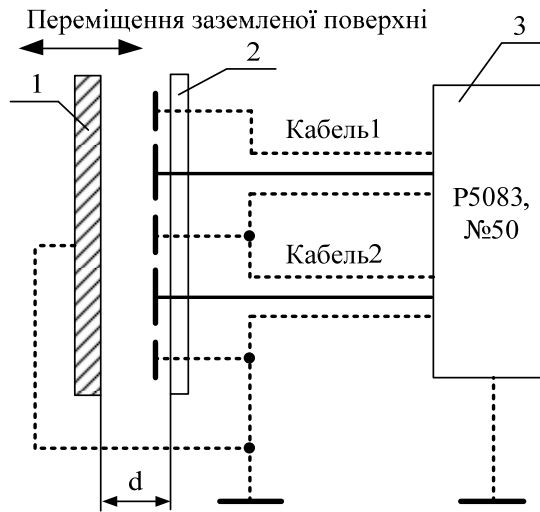


Рис. 4. Схема експериментального дослідження

Для вирішення задачі лінійної апроксимації в загальному випадку знаходять умови мінімізації суми квадратів відхилень для формули (2) пошуком коренів системи рівнянь за умови $dQ/db_k = 0$, де $k = 1, \dots, m$. Після розрахунку відповідних похідних, з урахуванням рівняння (2), отримаємо систему рівнянь Гауса:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (b_0c_0[n] + b_1c_1[n] + \dots + b_m c_m[n] - x[n])c_0[n] = 0 \\ \sum_{i=1}^n (b_0c_0[n] + b_1c_1[n] + \dots + b_m c_m[n] - x[n])c_1[n] = 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^n (b_0c_0[n] + b_1c_1[n] + \dots + b_m c_m[n] - x[n])c_m[n] = 0 \end{cases} \tag{3}$$

Для знаходження коефіцієнтів b_0, \dots, b_m системи (3) скористаємося методом найменших квадратів. На основі знайдених коефіцієнтів b_0, \dots, b_m для заданої моделі апроксимації будується крива $C_{12}[n]$

Для розрахунку функціональної залежності за формулою (2) використовувалися лінійна та поліноміальна моделі різних порядків для побудови апроксимуючої залежності. В результаті проведених аналітичних розрахунків отримані функціональні залежності та їх графіки. Графіки отриманих функціональних залежностей приведені на рис.5, на якому: 1 – графік отриманої експериментальної залежності, 2 – графік отриманої апроксимуючої (функціональної) залежності. При використанні лінійної моделі було отримано наступну залежність $C_{12} = 0,0439d - 0,0344$ графік якої приведено на рис.5.а. При використанні поліноміальної моделі другого порядку – $C_{12} = (0,7d^2 + 33,7d) \cdot 10^{-3}$ (рис.5.б). При використанні поліноміальної моделі 3-го порядку – $C_{12} = -0,0005d^3 + 0,0069d^2 + 0,0141d$ (рис.5.в). При використанні поліноміальної моделі четвертого порядку – $C_{12} = (0,06d^4 - 1,7d^3 + 14d^2 + 0,5d) \cdot 10^{-3}$ (рис.5.г). При аналізі отриманих функціональних залежностей обчислених по 20 точкам проведена оцінка найкращої апроксимуючої залежності виходячи із критерію мінімізації функціоналу (1). Оцінка проводилася для отриманих функціональних залежностей. В результаті оцінки було отримано: для лінійної моделі – $Q^2 = 0,9946$; для поліноміальної моделі при $m=2$ – $Q^2 = 0,9863$; для поліноміальної моделі при $m=3$ – $Q^2 = 0,9989$; для

поліноміальної моделі при $m=4 - Q^2 \approx 1$.

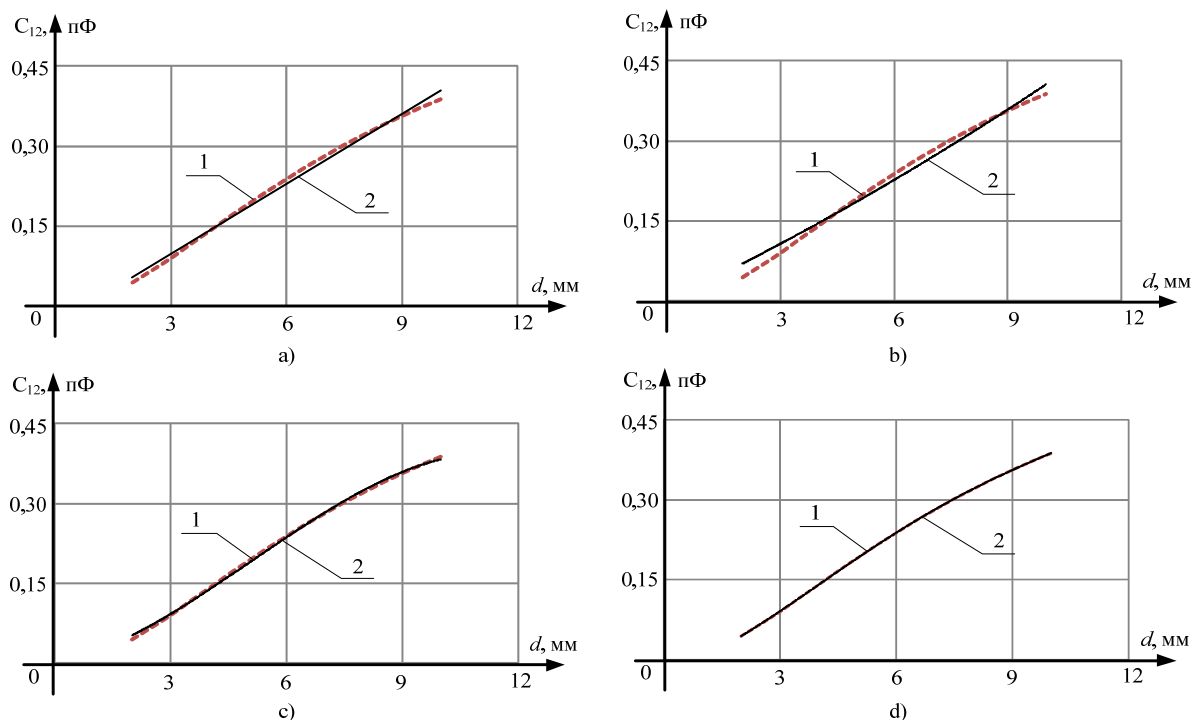


Рис. 5. Функціональні залежності

Відповідно до проведеного аналізу найбільше значення відхилення від одиниці має місце при використанні поліноміальної моделі другого порядку в якості функціональної залежності, а найменше значення забезпечує використання поліномів 3-4-го порядку зі значенням близьким до одиниці. Тобто найбільша похибка апроксимації серед розглянутих моделей має місце при використанні поліноміальної моделі другого порядку, а найменша похибка – при використанні поліноміальної моделі четвертого порядку. Використання поліномів більш високих порядків не є доцільним, так як вони не зменшують значення похибки апроксимації, але й в деяких випадках при використанні поліноміальних моделей високих порядків можуть дати в проміжних точках апроксимації аномально великі значення похибок.

Процедури розрахунків регресійних коефіцієнтів та побудови функціональних залежностей для області визначення залежності зміни ємності від значення експериментально заданого повітряного зазору проводилася при використанні засобів MS Excel та NI LabVIEW.

Висновки

При проведенні експериментальних дослідів запропонованою методикою було визначено залежність ємності сенсору від значення повітряного зазору між площиною електродів сенсора та площиною, що імітує заземлену поверхню полюса ротора капсульного гідрогенератора типу СГК538/160–70М. На основі теоретичних досліджень методами регресійного аналізу були отримані функціональні залежності значення ємності та проведено оцінку похибок отриманих функціональних залежностей та встановлено, що найменшу похибку забезпечує використання поліномів 3-4-го порядку.

Проведені експериментально-теоретичні дослідження розробленого компланарного ємнісного сенсору дозволили отримати функціональні залежності, які можливо використовувати при проектуванні ІВС контролю повітряного зазору в капсульному гідрогенераторі типу СГК538/160–70М.

Література

1. Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. - 6-е изд., с изм. и доп. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. Режим доступу: http://www.znaytovar.ru/gost/2/RD_34455130097_Obem_i_normy_is.html
2. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – Офіц. вид. – К.: ОЕП. ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2007. – 262 с.
3. Левицький А.С, Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.
4. VMTM Air Gap. Capacitive Measuring Chains. Режим доступу: <http://vibrosystem.com/wp-content/uploads/9628-25D1A-103.pdf>

5. Volkovas Vitalijus, Mikalauskas Robertas, Eidukeviciute Marija. Air gap measuring system for purpose of diagnostics and condition monitoring.
6. Griščenko Marina. Air gap monitoring unit generator to advance vibration diagnostic procedure : Summary of the Doctoral Thesis : Summary of the Doctoral Thesis. R. : RTU, 2015. – 20 p.
7. Air Gap Monitoring System. Режим доступу: <http://www.mc-monitoring.com/sensors/airgap-sensors.html>.
8. Федоренко Г.М. Вплив параметрів повітряного зазору на характеристики гідрогенераторів / Г.М. Федоренко, В.О. Саратов, В. В. Черниш // Гідроенергетика України. – 2005. – № 4. – С. 26–33.
9. Talas P. Dynamic measurement and analysis of air gap variations in large hy-droelectric generators / P. Talas, P. Toom // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. – 1983. – Vol. PAS-102, No. 9, September 1983. – P. 3098 – 3106.
10. Pat. 4821561 United States, МКИ G01M 15/00. Method of metering an air-gap in an electric rotating machine / Keiji Takahashi (Японія), Mamoru Zennoji (Японія); заявник і патентовласник Mitsuba Electric Mfg. Co., Ltd. (Японія). – № US 07/120618; заявл. 13.11.87; опубл. 18.04.89.
11. Pat. 4704906 United States, МКИ G01S 15/88, G01S 15/14, G01S 15/00, G01N 029/00. Dynamic air gap measuring device for use with rotating electrical machinery / Thomas Lynn Churchill (США), James M. Ross (США); заявник і патентовласник Electric Power Research Institute (США, Каліфорнія). – №US06/850234; заявл. 10.04.86; опубл. 10.11.87.
12. Пат. 86524 Україна, МПК G01B 7/14, G01R 27/26. Спосіб вимірювання повітряного зазору між статором і ротором в гідрогенераторі та пристрій для його реалізації / Поташник С.І., Вошинський К.В., Грубой О.П., Левицький А.С., Небо-любов Є.Ю., Новік А.І., Федоренко Г.М., Шофул А.К.; заявник і патентовласник ВАТ «Укргідроенерго» (Україна). – № а 2007 12431; заявл. 09.11.07; опубл. 27.04. 09, Бюл. № 8.
13. Патент РФ № 2318182, МПК G01B 7/14. Устройство измерения воздушного зазора / Скворцов О. Б. , Радчик И. И., Тараканов В. М., Трунин Е. С., Смирнов С. И. ; Заявитель и патентообладатель ООО "ДИАМЕХ-2000" (Россия). – 2006128904/28; заявл. 09.08.2006; опубл. 27.02.2008, Бюл. № 6
14. Заявка на патент України, МКИ G01B7/14. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в генераторах / Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. ; заявник Інститут електродинаміки НАН України. – № а 2016 03404; заявл. 01.04.2016.
15. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов // Монография: пер. с англ. под ред. Ю. К. Беляева – М.: Мир. – 1976. – 757 с.

References

1. Ob'em i normy ispytaniy e'lektrooborudovaniya / Pod obshh. red. B.A. Alekseeva, F.L. Kogana, L.G. Mamikonya-nca. - 6-e izd., s izm. i dop. - M.: Izd-vo NC E'NAS, 2004. Rezhim dostupu: http://www.znaytovar.ru/gost/2/RD_34455130097_Obem_i_normy_is.html
2. Normi viprobuvannya elektroobladnannya: SOU-N EE 20.302:2007. – Ofic. vid. – K.: OEP. GRIFRE: M-vo pali-va ta energetiki Ukraїni, 2007. – 262 s.
3. Levic'kij A.S, Fedorenko G.M., Gruboj O.P. Kontrol' stanu potuzhnix gidro- ta turbogeneratoriv za dopomo-goyu emnisnix vimiryuvachiv parametriv mexanichnix defektiv. – Kiiv: In-t elektrodinamiki NAN Ukraїni, 2011. – 242 s.
4. VMTM Air Gap. Capacitive Measuring Chains. Dostup: <http://vibrosystm.com/wp-content/uploads/9628-25D1A-103.pdf>
5. Volkovas Vitalijus, Mikalauskas Robertas, Eidukeviciute Marija. Air gap measuring system for purpose of diagnostics and condition monitoring. Rezhim dostupu: http://www_bg_utp_edu_plartdiagnostyka2004volkovas.pdf.
6. Griščenko Marina. Air gap monitoring unit generator to advance vibration diagnostic procedure : Summary of the Doctoral Thesis : Summary of the Doctoral Thesis. R. : RTU, 2015. – 20 p.
7. Air Gap Monitoring System. Rezhim dostupu: <http://www.mc-monitoring.com/sensors/airgap-sensors.html>.
8. Fedorenko G.M. Vpliv parametriv povitryanogo zazoru na xarakteristiki gidrogeneratoriv / G.M. Fedorenko, V.O. Saratov, V. V. Chernish // Gidroenergetika Ukraїni. – 2005. – № 4. – S. 26–33.
9. Talas P. Dynamic measurement and analysis of air gap variations in large hy-droelectric generators / P. Talas, P. Toom // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. – 1983. – Vol. PAS-102, No. 9, September 1983. – P. 3098 – 3106.
10. Pat. 4821561 United States, МКИ G01M 15/00. Method of metering an air-gap in an electric rotating machine / Keiji Takahashi (Японія), Mamoru Zennoji (Японія); заявник і патентовласник Mitsuba Electric Mfg. Co., Ltd. (Японія). – № US 07/120618; заявл. 13.11.87; опубл. 18.04.89.
11. Pat. 4704906 United States, МКИ G01S 15/88, G01S 15/14, G01S 15/00, G01N 029/00. Dynamic air gap measuring device for use with rotating electrical machinery / Thomas Lynn Churchill (SShA), James M. Ross (SShA); заявник і патентовласник Electric Power Research Institute (SShA, Kaliforniya). – №US06/850234; za-yavl. 10.04.86; opubl. 10.11.87.
12. Pat. 86524 Україна, МПК G01B 7/14, G01R 27/26. Sposib vimiryuvannya povitryanogo zazoru mizh statorom i rotorom v gidrogeneratori ta pristrij dlya jogo realizacii / Potashnik S.I., Voshhins'kij K.V., Gruboj O.P., Levic'kij A.S., Nebo-lyubov E.Yu., Novik A.I., Fedorenko G.M., Shoful A.K.; заявник і патентовласник ВАТ «Укргідроенерго» (Україна). – № а 2007 12431; заявл. 09.11.07; опубл. 27.04. 09, Byul. № 8.
13. Patent RF № 2318182, МПК G01B 7/14. Ustrojstvo izmereniya vozdušnogo zazora / Skvorcov O. B. , Radchik I. I., Tarakanov V. M., Trunin E. S., Smirnov S. I. ; Zayavitel' i patentoobladatel' ООО "DIAMEX-2000" (Rossiya). – 2006128904/28; заявл. 09.08.2006; опубл. 27.02.2008, Byul. № 6
14. Zayavka na patent Ukraїni, МКИ G01B7/14. Emnisnij sensor dlya vimiryuvannya povitryanogo zazoru v generato-rax / Levic'kij A.S., Zajcev E.O., Kromplyas B.A. ; заявник Інститут електродинаміки NAN Ukraїni. – № а 2016 03404; заявл. 01.04.2016.
15. Anderson T. Statisticheskij analiz vremennyx ryadov // Monografiya: per. s angl.– M.: Mir. – 1976. – 757 s.

Рецензія/Peer review : 24.6.2016 р. Надрукована/Printed :27.6.2016 р.
Стаття рецензована редакційною колегією