

ЄМНІСНІ ВИМІРЮВАЧІ ЗУСИЛЬ В СТЯЖНИХ ПРИЗМАХ ОСЕРДЯ СТАТОРА ПОТУЖНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ

Розглянуто варіанти побудови первинних і вторинних вимірювальних перетворювачів зусиль в стяжних призмах статорів турбогенераторів. Обґрунтовано вимоги до метрологічних характеристик вимірювачів, що базуються на ємнісних сенсорах. Описано конструктивні схеми первинних перетворювачів, що встановлюються під стяжні гайки осердя і складаються з диференціального (напівдиференціального) ємнісного сенсора та кільцевого пружного елемента. Розроблено компактний цифровий вторинний вимірювальний перетворювач, що має високу чутливість, обумовлену поєднанням зрівноважування вимірювального кола з подальшим аналого-цифровим перетворенням підсиленого сигналу нерівноваги. Виконано опис фізичних процесів у вторинному перетворювачі. Електронні вузли вторинного перетворювача реалізовано на однокристальному мікропроцесорі серії ARM типу STM32F100C4. Робота вузлів перетворювача синхронізується генератором імпульсів типу «меандр», який реалізовано на таймері мікропроцесора.

Мінімізації апаратних витрат на реалізацію пристрою досягнуто за рахунок максимального використання можливостей мікропроцесора – функції необхідних блоків виконують периферійні вузли мікропроцесора та керуюча програма. В результаті апаратні витрати скорочено до двох інтегральних мікросхем – мікропроцесора та операційного підсилювача.

Пристрій забезпечує вимірювання електричної інформативної ємності сенсорів з похибкою на рівні 1-2%.

Ключові слова: турбогенератор, статор, осердя, стяжна призма, зусилля, вимірювання, ємнісний сенсор, вторинний вимірювальний перетворювач, чутливість, мінімізація апаратних витрат.

P.I. BORSCHOV, A. S. LEVYTSKYI

Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine

CAPACITY MEASURING DEVICES OF EFFORTS IN TIGHTENING PRISMS OF STATOR CORE OF TURBOGENERATORS

The variants of construction of primary and secondary measuring transducers of efforts in the tightening prisms of stators of turbogenerators are considered. Requirements to metrological performances of the measuring devices based on capacity sensors are reasonable. The design scheme of primary transducers which are set under the tightening nuts core and consist of differential (semi differential) capacity sensor and circular resilient element are described. A compact digital secondary measuring transducer, having the high sensitiveness conditioned by combination of balancing of measuring chain with the further analog-digital increase signal of disbalance is developed. Description of physical processes in measuring electric circuits is executed. The electronic blocs of secondary transducer are realized on the one-chipper of series of ARM as STM32F100C4. Work of blocs of transducer is synchronized by a pulser as a "meander" that is realized on the timer of microprocessor.

Description of physical processes in measuring electric circuits is executed. Minimization of hardware-controlled expenses on realization of device is attained due to the maximal use of possibilities of microprocessor - the functions of necessary blocks are executed by the remote nodes of microprocessor and control program. As a result hardware-controlled expenses - are brief to two integral microcircuits - microprocessor and operating strengthener.

A device provides measuring of electric informing capacity of sensors with error at the level of 1-2 %.

Key words: turbogenerator, stator, core, tightening prism, effort, measuring, capacity sensor, secondary measuring transformer, sensitiveness, minimization of vehicle charges.

Щільність осердя статорів є однією з основних характеристик технічного стану електричних генераторів, що в значній мірі визначає експлуатаційну надійність. Досить часто спостерігається зниження щільності спресованості осердя, що може призвести до відносного зміщення листів активної сталі, а також появи і розвитку наступних дефектів: розпушування зубців крайніх пакетів, викришування фрагментів листів активної сталі, місцевого замикання листів і нагрівання пакетів, що в остаточному підсумку може спричинити тяжкі аварії [1]. Тому розробка і впровадження в практику ефективних методів контролю та діагностики стану спресованості осердя статорів є важливим і перспективним напрямком підвищення надійності роботи генераторів.

Під час виготовлення необхідна щільність осердя статора потужного турбогенератора забезпечується його пресуванням. В спресованому стані осердя утримується за допомогою натискних фланців (плит) та стяжних призм. Вимірювання зусиль в стяжних призмах дозволяє контролювати стан спресованості осердя, а також дає змогу регулювати ступінь затягування призм гайками для забезпечення рівномірності розподілу між призмами зусиль віддачі активної сталі осердя, яка виникає після зняття тиску пресу [2]. На даний час існуючі методи та засоби вимірювання зусиль не відповідають сучасним вимогам, і дослідження з покращення метрологічних параметрів таких вимірювачів є актуальними.

В роботі [3] описано спосіб вимірювання зусиль в стяжних призмах з використанням тензорезисторів, які наклеюються на шийки призм. Недоліком способу є неможливість тарування вимірювальних тензомостів на самих призмах. Тарування необхідно проводити на спеціальній тарувальній балці, що значно обмежує застосування цього методу.

Більш перспективним є спосіб, коли вимірювальні тензорезистори наклеюються на кільцевий пружний елемент, який встановлюється під стяжні гайки [4]. В такому випадку можна тарувати кожний окремий сенсор до встановлення на турбогенераторі, а потім з необхідною періодичністю його перевіряти. Недоліком способу є необхідність приклеювання резисторів на пружний елемент, бо з плином часу, під дією температури та електромагнітного поля клей старіє, і метрологічні характеристики сенсорів значно погіршуються.

Останнім часом в літературі (в основному закордонній) з'явилися повідомлення про розробку вимірювачів зусиль в стяжних призмах з використанням волоконно-оптичних брегівських решіток (ВБР), які, як і тензорезистори, наклеюються на спеціальні пружні елементи, що встановлюються під гайки [5,6]. Але технологія виготовлення таких волоконно-оптичних вимірювачів на даний час є досить складною і дорогою, вимагає застосування дорогого технологічного та метрологічного обладнання.

У відділі електричних та магнітних вимірювань Інституту електродинаміки НАН України для вимірювання зусиль в стяжних призмах створено ємнісні сенсори з використанням плоско-паралельного конденсатора зі змінним зазором, який дає можливість із високою чутливістю і точністю вимірювати переміщення в десятки, одиниці та навіть частки мікрометра, що дозволяє застосовувати їх для вимірювання малих лінійних деформацій пружного чутливого елемента. Передавальна характеристика «переміщення – зворотна величина ємності» такого сенсора принципово лінійна, стабільна в часі, є строго розрахунковою, тобто визначається тільки його геометричними розмірами, завдяки чому не потрібне тарування. Ефективний захист від впливу електричних полів забезпечується простим екрануванням сенсора (роль екрана зазвичай виконує електричний корпус і арматура) та сполучних проводів. До магнітних полів ємнісні сенсори не чутливі [7,8].

Диференціальні ємнісні сенсори застосовують при необхідності збільшення чутливості та стабільності функції перетворення вимірювача, зниження залежності результатів вимірювання від впливу неінформативних параметрів, наприклад, температурних змін геометричних розмірів електродів вимірювального конденсатора та коефіцієнту пружності пружного елемента. Конструкція диференційного ємнісного сенсора зі змінним зазором зображена на рис. 1. Сенсор містить пружний елемент 1 і електроди 2,3,4 і 5 вимірювальних конденсаторів. Сила стягування F сприймається пружним елементом 1, що спричиняє зміну ємностей диференційного конденсатора, що містить кільцеві електроди 2, 3, 4 і 5. Електроди 2 і 3 утворюють ємність C_1 , а 4 і 5 – ємність C_2 . Кільцева циліндрична ділянка пружного елемента 1 з розмірами D_1 , D_2 і L під впливом стягуючої сили F змінює свою довжину.

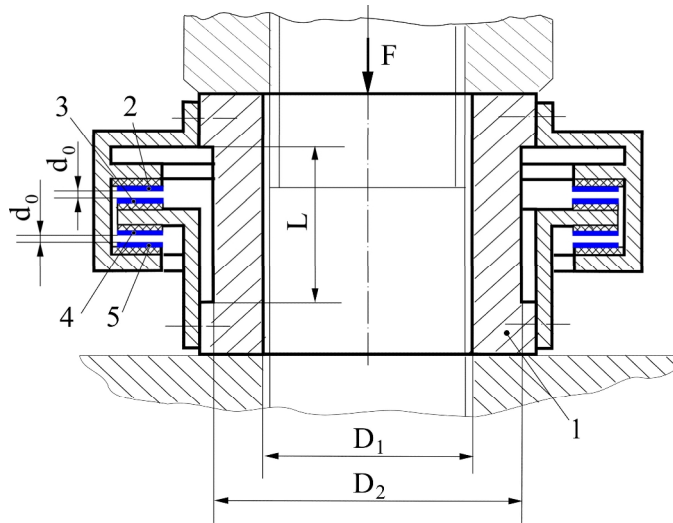


Рис. 1

Як відомо з [7], у диференційному ємнісному сенсорі зі змінним зазором активні площі обох конденсаторів зазвичай рівні, а відстань між крайніми електродами 2 і 4 не змінюється, тобто сума зазорів обох конденсаторів залишається постійною. Нехай у початковий момент зазори в обох конденсаторах дорівнюють c , а ємності – C_{10} і C_{20} . При стиску центральні електроди 3 і 4 змістяться на величину ΔL . Зазори в конденсаторі відповідно приймуть значення $d_0 - \Delta L$ і $d_0 + \Delta L$. При цьому величина ΔL визначається в такий спосіб [7]:

$$\Delta L = d_0 \frac{C_{1X} - C_{2X}}{C_{1X} + C_{2X}}, \quad (1)$$

де C_{1X} і C_{2X} – ємності частин диференційного конденсатора, виміряні після стиску.

З огляду на геометричні розміри кільцевого пружного елемента D_1 , D_2 і L (рис. 1), визначимо шукану силу стиску як

$$F = \frac{d_0(D_2^2 - D_1^2)E}{4L} \cdot \frac{C_{1X} - C_{2X}}{C_{1X} + C_{2X}}. \quad (2)$$

Прийнявши $K_1 = \frac{d_0(D_2^2 - D_1^2)E}{4L}$, запишемо вираз функції перетворення у вигляді

$$F = K_1 \frac{C_{1X} - C_{2X}}{C_{1X} + C_{2X}}. \quad (3)$$

Напівдиференціальні ємнісні сенсори. В деяких випадках через конструктивні складності диференціальний сенсор зі змінним зазором створити складно. Однак, якщо розмістити в одному корпусі поряд зі змінним робочим конденсатором конденсатор постійної ємності, що буде ідентичним робочому по конструкції, розмірам, застосовуваним матеріалам, то можна, як і в диференціальному конденсаторі, забезпечити значно меншу чутливість усього датчика до дестабілізуючих впливів. Такі сенсори одержали назву *напівдиференціальних* [7].

На рисунку 2 показана конструктивна схема такого сенсора. Зображено: 1 – пружний силівимірювальний чутливий елемент; 2 і 3 – електроди змінного робочого конденсатора; 4 і 5 електроди постійного еталонного конденсатора. Розміри електродів 2,3,4 і 5, а також зазори між ними d_1 , d_2 вибираються такими, щоб ємність C_{10} робочого конденсатора в початковому положенні (тобто при відсутності зусиль стиснення) була приблизно рівною ємності C_{20} еталонного.

Для напівдиференціальних сенсорів застосовують вторинні вимірювальні перетворювачі, що реалізують функцію перетворення у вигляді відношення C_{1X} / C_{20} (C_{1X} – змінна ємність робочого конденсатора) [7]. Лінійну деформацію пружного елемента ΔL можна записати у вигляді

$$\Delta L = k \left(1 - \frac{C_{20}}{C_{1X}} \right) \quad (4)$$

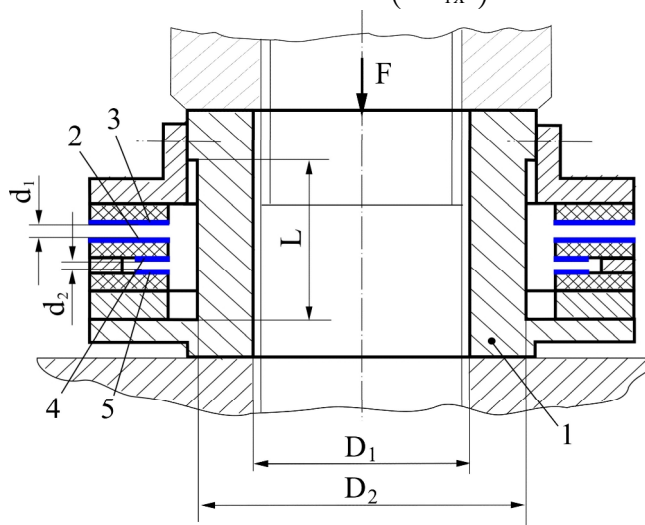


Рисунок 2

де k – коефіцієнт, який враховує геометричні розміри змінного робочого конденсатора. З огляду на (4), геометричні розміри D_1 , D_2 і L (рис. 2), запишемо формулу для визначення величини сили стиснення

$$F = \frac{kE(D_2^2 - D_1^2)}{4L} \cdot \left(1 - \frac{C_{20}}{C_{1X}} \right) \quad (5)$$

Позначивши $K_2 = \frac{kE(D_2^2 - D_1^2)}{4L}$, одержимо вираження функції перетворення у вигляді

$$F = K_2 \left(1 - \frac{C_{20}}{C_{1X}} \right). \quad (6)$$

Суттєвою проблемою, з якою доводиться стикатися при створенні вимірювачів фізичних величин на основі ємнісних сенсорів зі змінним зазором між електродами, є вплив на характеристику перетворення перекосів електродів, які призводять до відхилення характеристики перетворення від лінійної. Для

лінеаризації характеристики доводиться зменшувати відносну зміну зазору між електродами шляхом підвищення пружності чутливого елемента або шляхом збільшення початкового зазору між електродами. На практиці для досягнення прийнятних метрологічних параметрів коефіцієнт використання ємності сенсора (відношення корисного приросту ємності до початкової ємності) приймається на рівні одиниць відсотків.

Відносна приведена похибка вимірювання не повинна перевищувати 1- 2 %. Вказана похибка дозволяє віднести вимірювач до пристроїв середнього класу точності. Однак, беручи до уваги невелику відносну зміну інформативного параметру при максимальному зусиллі, висуваються досить високі вимоги до чутливості перетворювача. Для забезпечення стійкості результату вимірювання необхідно забезпечити поріг чутливості перетворювача відносно початкового значення інформативного параметра не більше, ніж $5 \cdot 10^{-5}$. Тобто, цифровий вимірювальний перетворювач повинен забезпечити перетворення вимірюваного зусилля у 14-розрядний двійковий код.

Одночасно до таких вимірювальних перетворювачів висувається вимога забезпечення мінімальних апаратних витрат, оскільки місце для розміщення вимірювальної апаратури у існуючих конструкціях генераторів є вельми обмеженим.

Метою даної роботи є обґрунтування структури вторинного вимірювального перетворювача, призначеного для роботи з ємнісними сенсорами зусиль, яка забезпечує мінімальні апаратні витрати та вартість при умові дотримання необхідних метрологічних параметрів.

Можна віділити два сучасних напрями побудови компактних вторинних вимірювальних перетворювачів середнього класу точності для роботи з ємнісними сенсорами [9]. Перший напрям – застосування спеціалізованих однокристальних сигма-дельта перетворювачів «ємність – цифровий код», наприклад, мікросхем AD7745-46, MAS6512 [10,11]. До переваг таких перетворювачів можна віднести простоту застосування та компактність. До їхніх недоліків відносяться вузький діапазон вимірювання ємності, невелика швидкодія, а також неможливість безпосередньої реалізації необхідних функцій перетворення (3) та (6), оскільки вказані перетворювачі можуть вимірювати лише абсолютні значення ємностей сенсора або їх різницю. При необхідності розширення діапазону вимірювання необхідно вводити додаткові аналогові вузли. Для реалізації функцій перетворення (3) та (6) необхідно проводити як мінімум два такти вимірювання, після чого обробляти результати додатковим контролером. Вказані фактори, враховуючи високу вартість самих мікросхем, приводять до збільшення розмірів та вартості створюваних пристроїв.

Другий напрям – використання компенсаційно-мостових вимірювальних перетворювачів. Такі перетворювачі мають високу завадостійкість, принципову лінійність характеристики перетворення, простоту реалізації. Принципи їх побудови детально викладені у науково-технічній літературі (наприклад [8]). Загальна структурна схема компенсаційно-мостового вимірювального перетворювача інформативних параметрів ємнісних сенсорів з порівнянням струмів показана на рис.3, де позначено: C1, C2 – конденсатори сенсора, КПН1, КПН2 – керовані подільники напруги, СА3 – система автоматичного зрівноважування, Nx – вихідний цифровий код, що відображає значення вимірюваної величини.

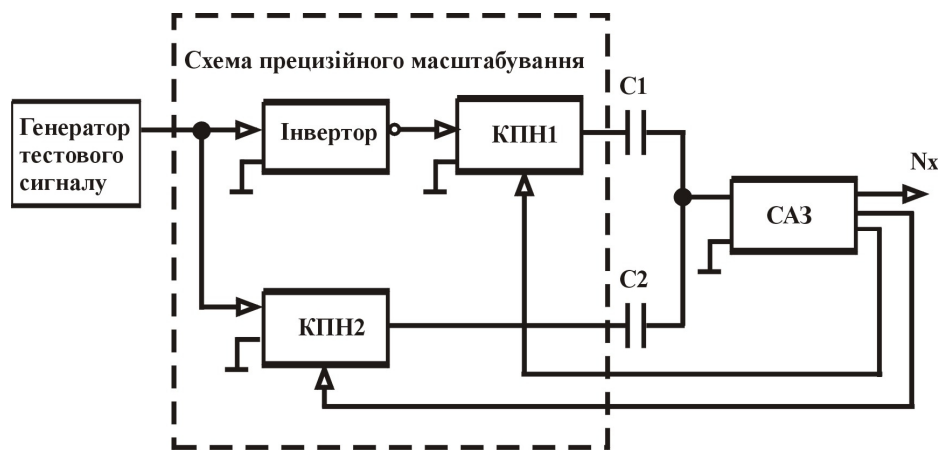


Рисунок 3

Напруга з генератора подається через керовані подільники напруги КПН1 та КПН2 на конденсатори C1 і C2 сенсора, при цьому одна з напруг протифазна іншій за рахунок дії інвертора. СА3 змінює коди, що керують КПН1 та КПН2 до досягнення рівності змінних струмів, що протікають через конденсатори C1 та C2. Необхідність застосування подільників КПН1 та КПН2 визначається типом сенсора. Для напівдиференціального сенсора зі змінною площиною перекриття електродів, у якого C1 – конденсатор постійної ємності, а C2 – змінний конденсатор, необхідний лише подільник КПН1, при цьому значення коду Nx пропорційно ємності C2. Для такого ж сенсора зі змінним зазором між електродами потрібен лише КПН2, при цьому Nx пропорційний величині, зворотній до C2:

$$N_x = N_m \cdot \frac{C_1}{C_2} \quad (7)$$

де N_m – максимальне значення коду керування КПН1 і КПН2.

Перехід від характеристики (7) до потрібної характеристики (6) легко здійснюється шляхом віднімання константи від результату перетворення. Така операція легко реалізується у контролері САУ.

При застосуванні диференційного сенсора для отримання характеристики виду (3) необхідно проводити узгоджене керування обома подільниками КПН1 і КПН2.

Тестовим сигналом може бути змінна напруга як синусоїдальної форми, так і інших форм. Для побудови компактних перетворювачів доцільно застосувати генератор тестового сигналу у вигляді періодичних імпульсів типу «меандр». У таких пристроях перетворювачі постійної опорної напруги та напруги зворотного зв'язку у амплітуді змінних напруг реалізуються дуже просто за допомогою комутаційних елементів [8]. Висока відносна чутливість вторинного перетворювача досягається шляхом поєднання початкового зрівноважування вимірювального кола за допомогою цифро-аналогових перетворювачів з подальшим аналого-цифровим перетворенням змін інформативного параметра сенсора, що відображають зміни вимірюваної величини.

У відділі електричних та магнітних вимірювань Інституту електродинаміки створено вторинний вимірювальний перетворювач інформативних параметрів ємнісних сенсорів зусиль, що характеризується високою відносною чутливістю, забезпечує достатню точність перетворення та реалізується з мінімальними апаратними витратами. Функціональну схему перетворювача показано на рис. 4, де позначено: ДОН – джерело опорної постійної напруги, ЦАП1, ЦАП2 – цифро-аналогові перетворювачі, ПСН – підсилювач сигналу нерівноваги вимірювального кола, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, СЗВ – система зрівноважування – вимірювання, N_x – вихідний цифровий код, що відображає значення вимірюваної величини.

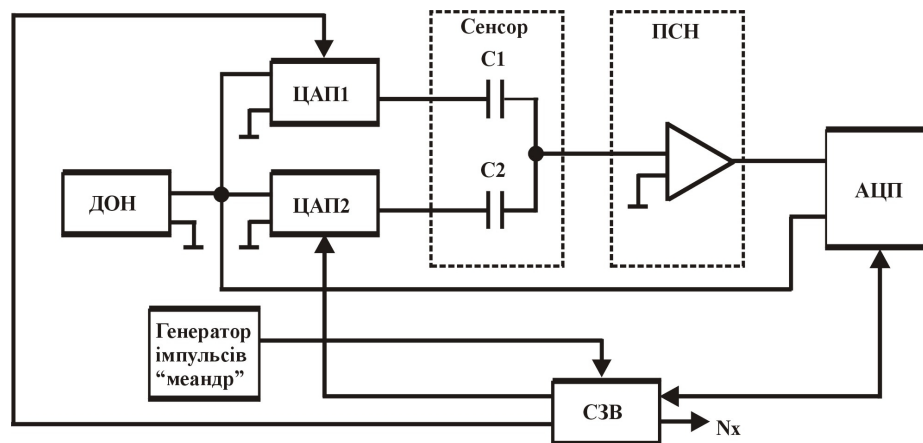


Рисунок 4

Всі вузли перетворювача, крім сенсора, ДОН і ПСН, реалізовано на однокристальному мікропроцесорі серії ARM (наприклад, типу STM32F100C4). Він має в своєму складі 12-розрядний АЦП та двоканальний 12-розрядний ЦАП. Протифазні змінні напруги прямокутної форми, що подаються на конденсатори сенсора, формуються на виходах ЦАП1 і ЦАП2. На опорні входи цих ЦАП подається постійна напруга з виходу ДОН. До абсолютного значення та стабільності цієї напруги жорсткі вимоги не висуваються, оскільки вихідний цифровий код пропорційний відношенню сигналу з виходу сенсора до напруги ДОН. Таким чином, у якості напруги ДОН можна використати або напругу живлення, або напругу з виходу резистивного подільника напруги живлення.

Робота вузлів перетворювача синхронізується генератором імпульсів типу «меандр», який реалізовано на таймері мікропроцесора. Таймер запрограмований таким чином, що його лічильник переповнюється кожні 50 мкс, при цьому генерується переривання фонові програми. У підпрограмі обробки цього переривання виконуються операції змін керуючих кодів ЦАП1 і ЦАП2.

Струм нерівноваги, тобто різниця змінних струмів, що протікають через конденсатори сенсора, перетворюється на вхідному опорі підсилювача у напругу, підсилюється і подається на вхід АЦП. У класичній схемі компенсаційно-мостового перетворювача на виході підсилювача необхідно включати фазочутливий детектор, що формує напругу, знак якої вказує на напрямок врівноважування вимірювального кола, а її значення характеризує відстань кола від стану рівноваги. У розробленому перетворювачі функцію фазочутливого детектора покладено на програму процесора. АЦП здійснює перетворення миттєвих значень підсиленої напруги нерівноваги у цифрові відліки, які накопичуються у внутрішньому оперативному запам'ятовуючому пристрої (ОЗУ) мікропроцесора. Час одного аналого-цифрового перетворення (для тактової частоти 8 МГц) складає 1,75 мкс. Тобто за половину періоду змінних напруг (50 мкс), що діють на конденсатори сенсора, можна отримати 28 цифрових відліків. Після цього обчислюють середнє значення відліків АЦП за кожну половину періоду. Знак різниці цих середніх значень дає інформацію про напрямок зрівноважування вимірювального кола. Значення різниці дозволяє отримати інформацію про відстань до точки рівноваги. Використовуючи цю інформацію, обчислюється необхідний приріст і проводяться зміни

кодів ЦАП.

Алгоритм керування ЦАП1 і ЦАП2 залежить від типу ємнісного сенсора. Для напівдиференціального сенсора зі змінним зазором між електродами конденсатора C_2 у першій половині періоду тестового сигналу на ЦАП1 подається максимальний керуючий код N_m , а на ЦАП2 – нульовий код. У другій половині періоду на ЦАП1 подається нульовий код, а на ЦАП2 – код зрівноважування вимірювального кола $N_{зр}$. Після завершення зрівноважування код $N_{зр}$ з точністю до молодшого розряду відповідає співвідношенню (7). Для диференційного сенсора у першій половині періоду на ЦАП1 подається N_m , а на ЦАП2 – $N_{зр}$. У другій половині періоду на ЦАП1 подається $N_{зр}$, а на ЦАП2 – нульовий код. В результаті зрівноважування код $N_{зр}$ з точністю до молодшого розряду визначається так:

$$N_{\Phi} = N_m \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (8)$$

Перехід від (8) до (3) легко здійснюється мікропроцесором у цифровій формі.

Після завершення операції зміни коду $N_{зр}$ напруга нерівноваги вимірювального кола стає меншою, ніж одиниця молодшого розряду ЦАП. У ОЗУ записуються два значення коду АЦП, що відповідають сусіднім значенням коду $N_{зр}$ – з обох сторін від рівноваги. Вони використовуються для визначення частки молодшого розряду ЦАП, необхідної для досягнення рівноваги. Вихідний цифровий код визначається у вигляді суми цілої та дробової частин коду ЦАП.

Зниження порогу чутливості пристрою до рівня, меншого за одиницю молодшого розряду ЦАП, досягається за рахунок підсилення сигналу рівноваги. Еквівалентний коефіцієнт зниження порогу чутливості визначається наступним чином:

$$K_s \approx \frac{C_2}{C_1 + C_2 + C_m} \cdot K_{I \text{ Ні}} \quad (9)$$

де C_1 , C_2 – ємності сенсора, C_m , $K_{\text{ПСН}}$ – коефіцієнт підсилення ПСН. На практиці нескладно досягти значення K_s більше 10. Тобто еквівалентна кількість двійкових розрядів вихідного коду може скласти більше 15 (12 розрядів ЦАП + більше 3 розрядів АЦП), що цілком відповідає технічним вимогам до вторинного вимірювального перетворювача для ємнісного сенсора зусиль.

Висновки.

Розроблено компактний цифровий компенсаційно-мостовий вторинний вимірювальний перетворювач для ємнісних сенсорів зусиль, що характеризується високою чутливістю, яку досягнуто за рахунок поєднання зрівноважування з подальшим аналого-цифровим перетворенням підсиленого залишкового сигналу нерівноваги вимірювального кола.

Пристрій здатний перетворювати інформативні параметри ємнісних сенсорів з приведеною відносною похибкою на рівні 1-2%, при малих відношеннях корисного приросту ємності до початкової ємності (на рівні одиниць відсотків).

Мінімізація апаратних витрат на реалізацію пристрою досягнуто за рахунок максимального використання можливостей мікропроцесора – функції необхідних блоків покладено на периферійні вузли мікропроцесора та керуючу програму. В результаті апаратні витрати скорочено до двох інтегральних мікросхем – мікропроцесора та операційного підсилювача.

Пристрій може бути застосований не тільки для вимірювання зусиль, але й для побудови вимірювачів інших фізичних величин – лінійних та кутових переміщень, діелектричних властивостей матеріалів та ін., де використовуються напівдиференціальні та диференціальні ємнісні сенсори.

Література

1. Фомин Б. П., Циханович Б. Г., Виро Г. М. Технология крупного электромашиностроения. Т.1: Турбогенераторы. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
2. Остерник Э. С. О механических параметрах для оценки надежности турбогенераторов разъемной конструкции // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Динаміка та міцність машин, № 52. – Вестник НТУ "ХПИ", 2011. Режим доступу: http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/vestnik/Динамика_и_прочность_машин/2011/52/20115220.pdf (дата звернення 08.09.2017).
3. Остерник Э. С. Моделирование и анализ погрешностей схем при исследовании напряжений в мощных электромашин // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Динаміка та міцність машин, № 42. – Вестник НТУ "ХПИ", 2009. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/vcpi/dim/2009_42/20094219.pdf (дата звернення 08.09.2017).
4. Федоренко Г. М., Бут А.А., Кузьмин В. В. И др. Методика и измерительные средства определения усилий прессовки в сердечнике статора мощного турбогенератора // Техн. электродинамика. – 1991. – №4. – С. 64–69.
5. United States Patent No.9,016,991 B2. Int. Cl. F16B 31/02, H02 K1/16, H02 K11/00, 3P 19/06, G01L 1/24, G01L 5/24, G01 D 5/353. Bolt tightener device for tightening a through-bolt in a generator core / Twerdochlib Michael (US), Edward David (US), Diatzikis Evangelos V. (US); Assignee Siemens Energy, Inc. (Orlando, FL, US) – Appl. No. 13/863,473; Date of Patent Apr. 28, 2015.

6. United States Patent No. US 20120026482 A1. Int. Cl. G01J5/48. Use of fiber optic sensor techniques for monitoring and diagnostics of large AC generators / George Franklin Dailey (US) – Appl. No. US 13/065,842; Pub. date Feb. 02, 2012.
7. Левицький А.С., Федоренко Г.М. Датчики для вимірювання зусилля пресування осердя статорів гідро- і турбогенераторів // Гідроенергетика України. – 2009. – №4. – С.35 – 39.
8. Гриневич Ф.Б., Новик А.И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками.- Киев : Наук. думка. – 1987. – 112 с.
9. Неболюбов Е.Ю., Новик А.И. Электронные преобразователи для работы с емкостными датчиками (аналоговые и цифровые) // Техн. электродинамика.– 2015. – № 3.– С.67–74.
10. AD7745/AD7746 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor (rev.0). Available at: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (accessed 18.05.2017).
11. Capacitive Sensor Signal Interface IC MAS6512. Available at: <http://www.mas-oy.com/wp-content/uploads/2016/06/MAS6512-Press-release>. (accessed 18.05.2017).

References

1. Fomin B. P., Tsihanovich B. G., Viro G. M. Tehnologiya krupnogo elektromashinostroeniya. T.1: Turbogeneratoryi. – L.: Energoizdat, 1981. – 392 s.
2. Osternik E. S. O mehanicheskikh parametrokh dlya otsenki nadezhnosti turbogeneratorov raz'emnoy konstruktssii // Sbornik nauchnykh trudov "Vestnik NTU "HPI" : Dynamika ta mitsnist' mashyn, # 52. – Vestnik NTU "HPI", 2011. Rezhym dostupu: http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/vestnik/ Динамика и прочность машин/2011/52/20115220.pdf (accessed 08.09.2017).
3. Osternik E. S. Modelirovanie i analiz pogreshnostey shem pri issledovanii napryazheniy v moschnykh elektromashinah // Sbornik nauchnykh trudov "Vestnik NTU "HPI" : Dynamika ta mitsnist' mashyn, # 42. – Vestnik NTU "HPI", 2009. Rezhym dostupu: http://www.nbu.gov.ua/old_jm/natural/vcp/dim/2009_42/20094219.pdf (accessed 08.09.2017).
4. Fedorenko G. M., But A.A., Kuzmin V. V. i dr. Metodika i izmeritelnyye sredstva opredeleniya usiliy pressovki v serdechnike statora moschnogo turbogeneratorsa // Tehn. elektrodinamika. – 1991. – #4. – S. 64–69.
5. United States Patent No.9,016,991 B2. Int. Cl. F16B 31/02, H02 K11/16, H02 K11/00, 3P 19/06, G01L 1/24, G01L 5/24, G01 D 5/353. Bolt tightener device for tightening a through-bolt in a generator core / Twerdochlib Michael (US), Edward David (US), Diatzikis Evangelos V. (US); Assignee Siemens Energy, Inc. (Orlando, FL, US) – Appl. No. 13/863,473; Date of Patent Apr. 28, 2015.
6. United States Patent No. US 20120026482 A1. Int. Cl. G01J5/48. Use of fiber optic sensor techniques for monitoring and diagnostics of large AC generators / George Franklin Dailey (US) – Appl. No. US 13/065,842; Pub. date Feb. 02, 2012.
7. Levytskyi A.S., Fedorenko H.M. Datchyky dlia vymiryuvannya zussyllia presuvannya oserdia statoriv hidro- i turboheneratoriv // Hidroenerhetyka Ukrainy. – 2009. – №4. – С.35 – 39.
8. Grinevich F.B., Novik A.I. Izmeritelnyye kompensatsionno-mostovyye ustroystva s emkostnyimi datchikami.- Kiev : Nauk. dumka. – 1987. – 112 s.
9. Nebolyubov E.Yu., Novik A.I. Elektronnyye preobrazovateli dlya raboty s emkostnyimi datchikami (analogovyye i tsifrovyye) // Tehn. elektrodinamika.– 2015. – # 3.– С.67–74.
10. AD7745/AD7746 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor (rev.0). Available at: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (accessed 08.09.2017).
11. Capacitive Sensor Signal Interface IC MAS6512. Available at: <http://www.mas-oy.com/wp-content/uploads/2016/06/MAS6512-Press-release> (accessed 08.09.2017).

Отримана/Received : 16.9.2017 р. Надрукована/Printed : 10.10.2017 р.
Стаття рецензована редакційною колегією