

ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

УДК 621.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.095>

ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ВИМІРЮВАЧІВ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ МЕХАНІЧНИХ ДЕФЕКТІВ ПОТУЖНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Є.О. Зайцев*, канд. техн. наук,
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: ZaitsevIO@nas.gov.ua

Наведено фізичні процеси, що впливають на розвиток механічних дефектів у потужних генераторах. Показано необхідність вирішення актуального науково-практичного завдання виявлення та ідентифікації дефектів для забезпечення безпеки, надійності та довговічності експлуатації потужних генераторів. Вирішення завдання потребує реалізації програмно-алгоритмічного забезпечення для електронно-оптичних вимірювачів систем контролю та технічної діагностики потужних генераторів. Приведено огляд переваг та недоліків вторинних вимірювальних перетворювачів, які можуть бути використані для реалізації електронно-оптичних вимірювачів параметрів механічних дефектів. Показано можливість використання як перетворювача ємність-код інтегральної мікросхеми AD7745/46. Наведено блок-схему апаратно-програмного забезпечення оптико-електронного вимірювача із вторинним вимірювальним перетворювачем на основі інтегральної мікросхеми AD7745/46 в структурі апаратно-програмного забезпечення комп'ютеризованої системи контролю та технічної діагностики потужних генераторів. Розроблено загальний алгоритм функціонування вторинного вимірювача механічних дефектів потужних генераторів на базі інтегральної мікросхеми AD7745/46. Бібл. 20, рис. 3.

Ключові слова: генератор, контроль, програмне забезпечення, перетворювач ємність-код (CDC), алгоритм.

Постановка проблеми. Безпека, надійність та довговічність експлуатації потужних генераторів – складні завдання, які насамперед пов'язані із забезпеченням достовірного контролю роботи енергетичного обладнання, а також оптимальних умов його експлуатації.

Вирішення завдання забезпеченням достовірного контролю роботи енергетичного обладнання базується на своєчасному виявленні та ідентифікації дефектів, пошкоджень та відмов, які є наслідком конструктивних, виробничих, експлуатаційних і деградаційних причин [1–3]. Виявлення та ідентифікація дефектів при проведенні діагностики потужного генеруючого обладнання базується на вимірюванні, перетворенні та обробці інформаційних сигналів.

Значна кількість дефектів, що виникають у потужних генераторів, може бути виявлена за умови контролю параметрів механічних дефектів, відхилення яких від норми супроводжується зміною фізичних процесів (рис. 1) у вузлах генератора і є характеристикою його технічного стану. У цьому разі під дефектом відповідно до [4, 5] розуміється «кожна окрема невідповідність продукції встановленим вимогам». У більш вузькому розумінні, з погляду контролю і діагностики, під дефектом машини або апарата розуміють таке відхилення від номінальних значень параметрів контрольованого об'єкта, який працює в заданому режимі, що відразу або із часом може призвести до повної або часткової втрати працездатності об'єкта. Діагностичною ознакою відповідно до [6] називається «ознака (параметр) об'єкта діагностування, використовувана у встановленому порядку для визначення технічного стану об'єкта».

Знання перебігу зазначених процесів дає змогу розробляти конструкторсько-технологічні вимоги щодо запобігання дефектам ще на стадії проектування генератора, а якщо це повністю зробити не вдається, то створити методи їхнього раннього виявлення системами технічної діагностики за характерними діагностичними ознаками. Також при цьому по-

трібно враховувати, що діагностичні ознаки потужних генераторів не мають чіткої, однозначної прив'язки до певних дефектів, що затрудняє їхню ідентифікацію.

Для правильної ідентифікації діагностичних ознак механічних дефектів необхідно враховувати умови режиму роботи машини (електричні параметри), тип машини та умови її збирання й запуску в експлуатацію, накопичувати та аналізувати великий обсяг діагностичної інформації, уточнювати та коректувати встановлені при проектуванні значення параметрів, які характеризують граничні стани, і здійснювати поточний контроль.

У свою чергу зміна механічного параметра свідчить про виникнення взаємних зміщень конструктивних елементів вузла, що контролюється.

Для реалізації перерахованих функцій використовуються спеціалізовані вимірювальні перетворювачі, які призначені для перетворення механічної енергії в цифровий інформаційний сигнал. Як показано в [7], перспективним для вимірювання механічних параметрів потужного генеруючого обладнання є використання оптико-електронних вимірювачів параметрів механічних дефектів потужних генераторів.

Отже, для вирішення завдання забезпеченням достовірного контролю роботи енергетичного обладнання необхідна наявність вимірювачів механічних параметрів, які є невід'ємною частиною комп'ютеризованих систем контролю зі спеціалізованим програмним забезпеченням, що дозволяють своєчасно виявити дефекти, виникаючі за експлуатації потужного генеруючого обладнання.

У зв'язку з викладеним актуальною є задача розробки спеціалізованого алгоритмічного та відповідного програмно-математичного забезпечення оптико-електронних вимірювачів механічних параметрів, які є складовою систем технічної діагностики потужних генераторів.

Матеріали і результати досліджень. Однією зі складових оптико-електронних вимірювачів механічних параметрів систем технічної діагностики є програмно-алгоритмічне забезпечення. У цьому разі останнє призначене для приймання, відображення та формування контрольної-діагностичної інформації, що використовується в системах контролю та технічної діагностики для розпізнавання дефектів і несправностей вузлів і деталей потужних генераторів.

Одним із вузлів оптико-електронних вимірювачів, що визначає алгоритм його функціонування, технічні та метрологічні характеристики, є перетворювач механічної енергії в цифровий інформаційний сигнал.

Аналіз закордонних та вітчизняних вимірювачів механічних параметрів електроенергетичного обладнання показує, що найбільшого використання набули перетворювачі, які базуються на ємнісному методі вимірювання [8–13]. Останнє пов'язане з суттєвими перевагами ємнісних вимірювачів над іншими типами. Ці переваги насамперед обумовлені:

- нечутливістю до впливу потужних електромагнітних полів;
- збереженням характеристик сенсора в широкому діапазоні робочих температур, який визначається лише стійкістю матеріалів, що застосовуються;
- різноманітністю форм і розмірів ємнісних сенсорів, що дозволяють використовувати їх у різних контрольних-діагностичних точках електроенергетичного обладнання;
- простотою конструкції та її реалізації за умов одиничного й серійного виробництва;
- простотою розрахунків геометричних характеристик чутливого елемента сенсора;
- відносно невисокою вартістю матеріалів та компонентів, що використовуються для виготовлення;



Рис. 1

– отриманням принципово лінійних функцій перетворення сенсорів;
 – можливістю виготовлення первинних вимірювальних перетворювачів для сенсорів, які можуть бути розроблені на базі сучасних інтегральних мікросхем.

Ємнісні вимірювачі фіксують значення ємності C_x як залежність від мікропереміщень d_x конструктивних елементів машини відносно електродів сенсора вимірювача, що викликана перебігом фізичних процесів у машині. У цьому разі функціональна залежність від мікрозміщення матиме вигляд

$$C_x = K \cdot f(d_x), \quad (1)$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

Для отримання контрольної-діагностичної інформації відповідно до виразу (1) та передачі її до програмно-математичних засобів обробки системи контролю та діагностики необхідно забезпечити перетворення аналогової величини сенсора C_x у цифровий код. Для такого перетворення використовуються вторинні вимірювальні перетворювачі, які утворюють "вимірювальний канал". Відповідно до ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Терміни та визначення» [14] вимірювальний канал – сукупність засобів вимірювання, первинних (сенсорів) та вторинних (вимірювальних перетворювачів параметрів сигналів та кіл) засобів зв'язку та аналого-цифрового перетворювача.

У цьому разі вторинні вимірювальні перетворювачі можуть бути реалізовані різними способами і найбільш поширеними на даний час, із урахуванням сучасної компонентної бази, є використання: компенсаційно-мостових вимірювальних кіл із дискретним (цифровим) виходом [15, 16]; перетворювачів ємність-напруга з дискретним (цифровим) виходом [17]; інтегральних перетворювачів ємність-код.

Використання компенсаційно-мостових вимірювальних кіл в гібридних електронно-оптичних системах обмежено через їх складність, відносно велике енергоспоживання та розміри. Деякою мірою наведених недоліків позбавлені перетворювачі ємність-напруга із дискретним (цифровим) виходом. Основною перевагою таких перетворювачів є їх можливість роботи при вимірюванні швидкозмінних мікропереміщень, що, наприклад, мають місце при вимірюванні биття валів ТТ та ТГ або при вимірюванні повітряного зазору між ротором та статором ГГ в динамічному режимі. При вимірюванні низькочастотних та інфранизькочасто-

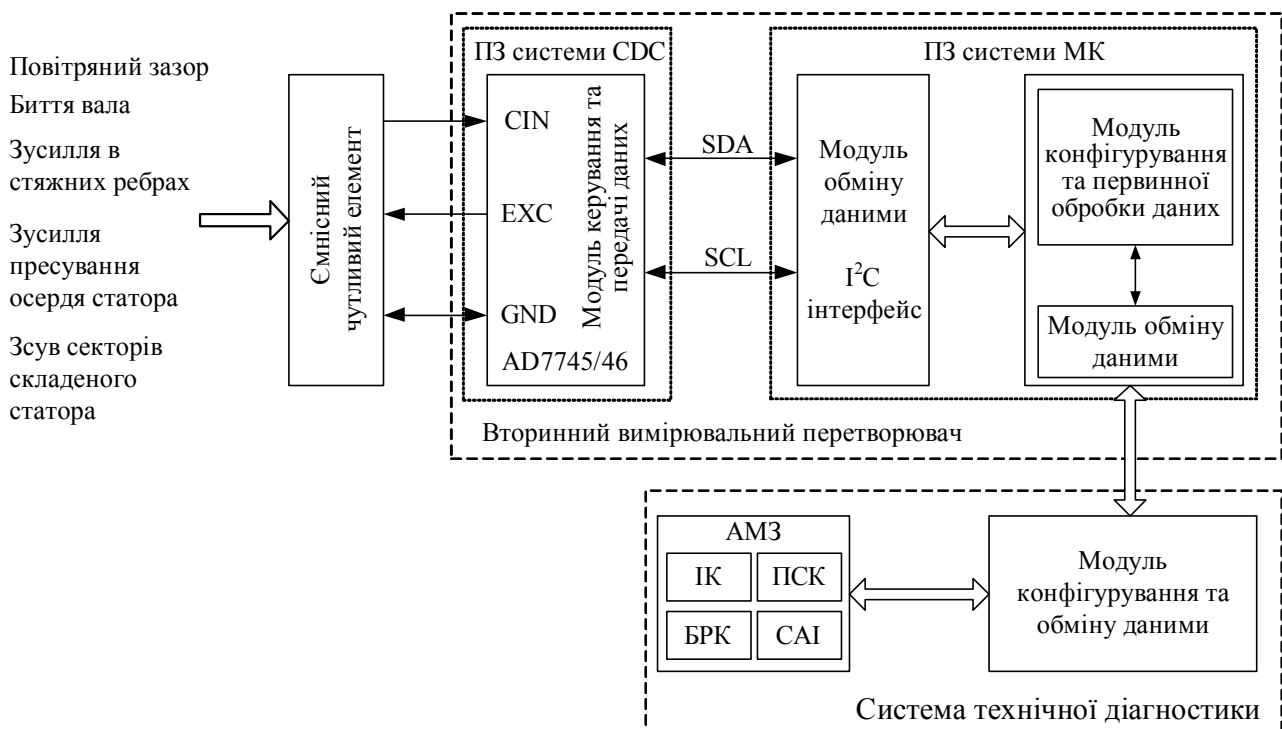


Рис. 2

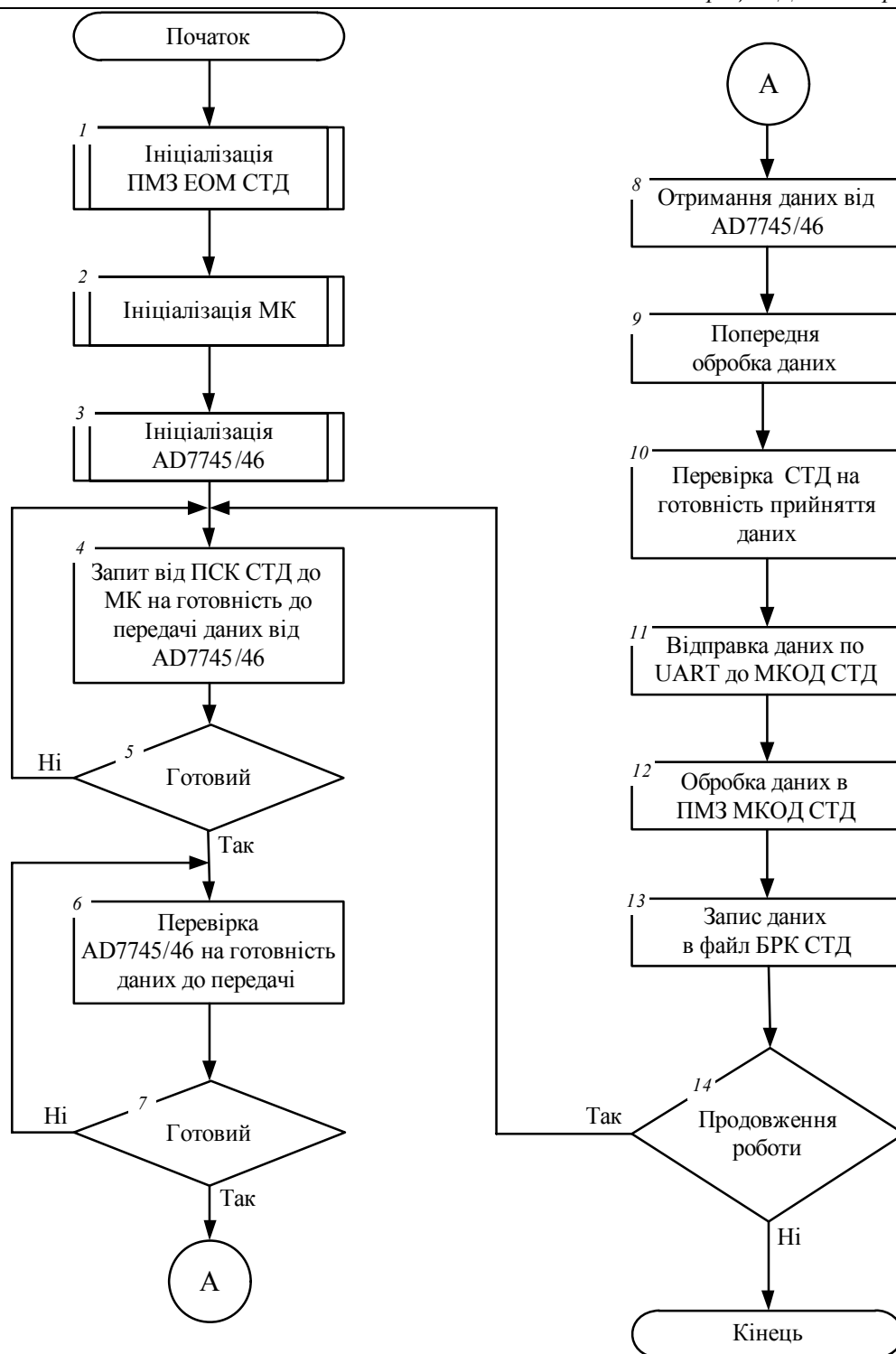


Рис. 3

тних мікропереміщень за допомогою ємнісних сенсорів найбільш прийнятним варіантом є використання інтегральних мікросхем перетворювачів ємність-код. Серед них найбільшого поширення набули мікросхеми AD7745 / AD7746 та AD7747 виробництва Analog Devices, Inc. (Norwood, MA, USA) та FDC1004 виробництва Texas Instruments, Inc. (Dallas, TX, USA), що побудовані на використанні сигма-дельта перетворювачів ємності в цифровий код (capacitance-to-digital converter, CDC) з високою роздільною здатністю. Такі перетворювачі забезпечують високу точність вимірювання ємності, мають зручний цифровий інтерфейс, малі розміри, а також при цьому мають відносно низьку вартість у порівнянні з готовими перетворювачами ємність-код.

Мікросхеми AD7747 та FDC1004 призначені для роботи з несиметричними або диференціальними ємнісними сенсорами і можуть бути використані у випадку, коли одна обклад-

ка підключена до землі [18]. Для роботи з ємнісними датчиками компланарного типу, які використовуються в гібридних електронно-оптичних вимірювачах призначені мікросхеми AD7745 та AD7746, які дозволяють вимірювати ємність за тризатисною потенційно токовою схемою підключення, яка дає змогу забезпечити захист від впливу взаємних паразитних ємностей та витоків [19]. Перетворювачі AD7745 та AD7746 є аналогічними за характеристиками, але мають відмінність за кількістю каналів для вимірювання ємності. Перевагами використання мікросхем AD7745/46 є наявність сигма-дельта АЦП з високою роздільною здатністю в 24 біта з максимальною частотою вибірок, рівною 90 SPS, висока лінійність ($\pm 0,01\%$), висока точність (± 4 фФ) зі стандартним діапазоном вимірювання до 4 пФ, можливість перебудови внутрішніх параметрів (постійних часу фільтрів, коефіцієнтів підсилення, режиму роботи АЦП тощо), низьке енергоспоживання струму до 0,7 мА для діапазону напруги живлення від 2,7 до 5,25 В, а також використання простого двопровідного інтерфейсу I²C [20].

При використанні у якості перетворювача ємність-код інтегральної мікросхеми AD7745/46 з'являється можливість розташування перетворювача у безпосередній близькості із сенсором, уникаючи таким чином виникнення паразитної ємності сполучних ліній та впливу зовнішніх полів на значення інформативної складової ємності, що дозволяє реалізувати компактні первинні вимірювачі із цифровим виходом. На рис. 2 представлено блок-схему апаратно-програмного забезпечення оптико-електронного вимірювача із вторинним вимірювальним перетворювачем на основі інтегральної мікросхеми AD7745/46 у структурі апаратно-програмного забезпечення комп'ютеризованої системи контролю та технічної діагностики потужних генераторів.

Функціонування вимірювача відбувається відповідно до алгоритму, що задається апаратно-програмними засобами (АМЗ) комп'ютеризованої системи контролю та технічної діагностики потужних генераторів, яка містить: програмно-алгоритмічні засоби керування роботою (ПСК); систему аналізу інформації (САІ); блок реєстрації інформації (БРК); інтерфейс користувача (ІК).

Узагальнена структура алгоритму функціонування вторинного вимірювача механічних дефектів потужних генераторів на базі інтегральної мікросхеми AD7745/46 наведена на рис. 3, де позначено: МК – мікроконтролер вторинного вимірювального перетворювача; СТД – система технічної діагностики; МКОД – модуль конфігурування та обміну даними; UART – послідовний інтерфейс.

Алгоритм програмного забезпечення вимірювача включає в себе початкову ініціалізацію регістрів AD7745/46, керування роботою AD7745/46 та його калібрування в разі необхідності, отримання даних, їхню попередню обробку та відправку до системи технічної діагностики.

Висновок. Невід'ємною частиною системи контролю та технічної діагностики будь-якого технологічного обладнання, в тому числі й потужних генераторів, на сьогодні є вимірювальні перетворювачі фізичних величин у цифрові інформаційні сигнали, які дають змогу вирішувати завдання забезпечення достовірного контролю роботи машини. Для функціонування вимірювачів на базі інтегральних мікросхем розроблено алгоритм, використання якого дозволить отримувати контрольну-діагностичну інформацію, що у свою чергу дасть змогу забезпечити необхідний рівень автоматизації та ефективності контролю й діагностики механічних параметрів машини.

1. Беляев С.А., Литвак В.В., Солод С.С. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС. Томск: Изд-во НТЛ, 2008. 218 с.
2. Андрущенко А.И. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС. Москва: Высш. шк., 1991. 301 с.
3. Мадоян А.А., Канцедалов В.Г. Дистанционный контроль оборудования ТЭС и АЭС. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 200 с.
4. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. Москва, Стандартинформ, 2009. 22 с.

5. Мамиконянц Л. Г., Элькинд Ю. М. Обнаружение дефектов гидрогенераторов. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
6. ГОСТ 20911 – 89. Техническая диагностика. Термины и определения. Москва, Стандартинформ, 2009, 10 с.
7. Левицький А.С., Зайцев Є.О. Гібридні волоконно-оптичні вимірювачі контрольно-діагностичних параметрів гідрогенераторів. *Гідроенергетика України*. 2016. № 3–4. С. 32–33.
8. Mikalauskas R., Volkovas V. Air gap modelling and control possibilities in rotary systems. *Ultragarsas*. No 1(46). 2003. Pp. 7–11.
9. Левицький А.С. Методи та прилади автоматичного виміру повітряного зазору в гідрогенераторах. *Гідроенергетика України*. 2007. №4. С. 29–35.
10. Pollock G.B., Lyles I.F. Vertical hydraulic generators experience with dynamic air gap monitoring. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1992. Vol. 7, No 4. Pp. 680–668.
11. Air Gap Measuring Systems LS 120-121 Transducers & ILS 730-731 Conditioners. Проспект фірми Vibrometer SA (Швейцарія). URL: <http://www.skf.com/files/058406.pdf> (дата звернення 14.09.2019)
12. Caetano R.E., Chabu I.E., Stolfi G., Santos J.C., Junior S.N., Gomes C.E., Paiva R.D., Nabeta S.I., Micerino F.J. Capacitive and Inductive Sensors for Diagnosing Air-Gap Anomalies in Synchronous Generators. *IEEE IEMDC*. 2015. Pp. 637–641.
13. Caetano R.E., Chabu I.E., Stolfi G., Santos J.C., Nagao S., Gomes C.E., Paiva R.D., Nabeta S.I., Micerino F.J., Development of distance sensors for diagnosing airgap anomalies in synchronous generators. 2015 IEEE 24th International Symposium on *Industrial Electronics (ISIE)*, 3–5 June 2015, Pp. 146–149. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2015.7281459> (дата звернення 14.09.2019).
14. ДСТУ 2681-94 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення. Київ, Держспоживстандарт, 1994, 72 с.
15. Гриневиц Ф.Б., Новик А.И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками. Киев: Наук. думка, 1987. 112 с.
16. Левицький А.С., Лежоев Р.С., Новик А.И. Дифференциально-емкостные измерительные преобразователи перемещения с линейной функцией преобразования. *Технічна електродинаміка*. 1983. № 6. С. 94–99.
17. 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.
18. AD7747 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7747.pdf> (дата звернення 14.09.2019)
19. Неболюбов Е.Ю., Новик А.И. Электронные преобразователи для работы с емкостными датчиками (аналоговые и цифровые). *Технічна електродинаміка*. 2015. № 3. С. 67–74.
20. AD7745/46 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (дата звернення 14.09.2019)

УДК 621.3

ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ МОЩНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Е.А. Зайцев, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
просп. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Приведены физические процессы, влияющие на развитие механических дефектов в мощных генераторах. Показана необходимость решения актуальной научно-практической задачи обнаружения и идентификации дефектов для обеспечения безопасности, надежности и долговечности эксплуатации мощных генераторов. Решение задачи требует реализации программно-алгоритмического обеспечения для электронно-оптических измерителей, входящих в состав систем контроля и технической диагностики мощных генераторов. Приведен обзор преимуществ и недостатков вторичных измерительных преобразователей, которые могут быть использованы для реализации электронно-оптических измерителей параметров механических дефектов. Показана возможность использования в качестве преобразователя емкость-код интегральной микросхемы AD7745/46. Приведена блок-схема аппаратно-программного обеспечения оптико-электронного измерителя с вторичным измерительным преобразователем на основе интегральной микросхемы AD7745/46 в структуре аппаратно-программного обеспечения компьютеризированной системы контроля и технической диагностики мощных генераторов. Разработан общий алгоритм функционирования вторичного измерителя механических дефектов мощных генераторов на базе интегральной микросхемы AD7745/46. Библ. 20, рис.3.

Ключевые слова: генератор, программное обеспечение, преобразователь емкости-код (CDC), алгоритм.

OPTO-ELECTRONIC TRANSDUCERS FOR POWERFUL GENERATORS MECHANICAL FAULT DIAGNOSING SYSTEMS: SOFTWARE ALGORITHMS

I.O. Zaitsev

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: ZaitsevIO@nas.gov.ua

The main goal of this paper it's considered the special software algorithms creation for the opto-electronic transducers for powerful generators mechanical fault diagnosing systems. For analysis of what functions are needed in the algorithms, the physical processes with influencing on mechanical defects evolution in powerful generators are presented. The necessity of solving important scientific and practical problem detection and identification of defects to ensure the safety, reliability, and durability of large generators is shown. The solution to the problem requires the implementation of software and algorithmic support for electron-optical meters included in the control systems and technical diagnostics of powerful generators. The advantages and disadvantages of secondary measuring transducers, which can be used to implement electron-optical meters of mechanical defects studied. The possibility of using as a converter capacitance-to-digital converter integrated circuit AD7745/46. A block diagram of the hardware and software of an optical-electronic meter with a secondary measuring transducer based on the AD7745/46 integrated circuit in the structure of the hardware and software of a computerized control system and technical diagnostics of powerful generators is presented. A general algorithm has been developed for the functioning of a secondary meter of mechanical defects of powerful generators based on the AD7745/46 integrated circuit. References 20, fig. 3.

Key words: generator, control, software, Capacitance-to-Digital Converter (CDC), algorithm.

1. Belyaev S.A., Litvak V.V., Malt S.S. Reliability of thermal power equipment of thermal power plants. Tomsk: NTL Publishing House, 2008. 218 p.
2. Andryushchenko A.I. Reliability of heat power equipment of TPPs and NPPs. Moscow: Vysshiaia shkola, 1991. 301 p.
3. Madoyan A.A., Kantsedalov V.G. Remote control of equipment of thermal power plants and nuclear power plants. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 200 p.
4. Interstate Standard 15467-79. Product Quality Management. Basic concepts. Terms and Definitions. Moscow, Standartinform, 2009, 22 p.
5. Mamikonyants L.G., Elkind Yu.M. Detection of defects in hydrogenerators. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 232 p.
6. Interstate Standard 20911 - 89. Technical diagnostics. Terms and definitions. Moscow, Stan-Dartinform, 2009, 10 p.
7. Levitsky A.S., Zaitsev Ie.O. Hybrid fiber optic transducers for control and diagnostic parameters of hydro generator. *Gidroenergetika Ukraine*. 2016. No 3–4. Pp. 32–33.
8. Mikalauskas R., Volkovas V. Air gap modelling and control possibilities in rotary systems. *Ultragarsas*. 2003. No 1(46). Pp. 7–11.
9. Levitsky A.S. Methods and instruments for automatic measurement of air gap in hydrogenerators. *Hydroenergetics of Ukraine*. 2007. No 4. Pp. 29–35.
10. Pollock G.B., Lyles I.F. Vertical hydraulic generators experience with dynamic air gap monitoring. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1992. Vol. 7. No 4. Pp. 680–668.
11. Air Gap Measuring Systems LS 120-121 Transducers & ILS 730-731 Conditioners. Проспект фірми Vibrometer SA (Швейцарія). URL: <http://www.skf.com/files/058406.pdf> (accessed: 14.09.2019)
12. Caetano R.E., Chabu I.E., Stolfi G., Santos J.C., Junior S.N., Gomes C.E., Paiva R.D., Nabeta S.I., Micerino F.J. Capacitive and Inductive Sensors for Diagnosing Air-Gap Anomalies in Synchronous Generators. *IEEE IEMDC*. 2015. Pp. 637–641.
13. Caetano R.E., Chabu I.E., Stolfi G., Santos J.C., Nagao S., Gomes C.E., Paiva R.D., Nabeta S.I., Micerino F.J. Development of distance sensors for diagnosing airgap anomalies in synchronous generators. 2015 IEEE 24th International Symposium on *Industrial Electronics (ISIE)*, 3–5 June 2015, Pp. 146–149. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2015.7281459> (accessed: 14.09.2019).
14. State Standard 2681-94 State system for ensuring uniformity of measurements. Metrology. Terms and definitions. Kyiv, Derzhspozhyvstandart, 1994, 72 p.
15. Grinevich F.B., Novik A.I. Measuring compensation bridge devices with capacitive sensors. Kyiv: Naukova dumka, 1987. 112 p.
16. Levitsky A.S., Lezhoev R.S., Novik A.I. Differential capacitive displacement transducers with linear conversion function. *Tekhnicheskaiia Elektrodinamika*. 1983. No 6. Pp. 94–99.
17. Levitsky A.S., Fedorenko G.M., Rough O.P. Control of the state of powerful hydro- and turbo-generators by means of capacitive meters of mechanical defect parameters. Kyiv: Institute of Electrodynamics, NAS of Ukraine, 2011. 242 p.
18. AD7747 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7747.pdf> (accessed: 14.09.2019)
19. Nebolyubov E.Yu., Novik A.I. Electronic converters for use with capacitive sensors (analog and digital). *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2015. No 3. Pp. 67–74.
20. AD7745/46 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (accessed: 14.09.2019)