

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-52>

УДК 621.313.322-82: 681.518.5

ГРАБКО ВОЛОДИМИР

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4666-1758>

e-mail: ygrabko@gmail.com

ГРАБКО ВАЛЕНТИН

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0003-8743-8258>

e-mail: gvv.1982@gmail.com

ОЩЕПКОВ ВІКТОР

Вінницький національний технічний університет

e-mail: viti113555@gmail.com

МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ РАДІАЛЬНОГО БИТТЯ РОТОРА ГІДРОГЕНЕРАТОРА ТЕПЛОВІЗІЙНИМ МЕТОДОМ

В роботі запропоновано підхід, яким передбачається встановлення вздовж радіусу ротора гідрогенератора лінійки інфрачервоних сенсорів з виведенням з них сигналів на мікроконтролер. Частина зазначеної лінійки виходить за межі обертання краю ротора. В процесі обертання ротора в кожен момент часу в поле зору лінійки інфрачервоних сенсорів потрапляє невеликий фрагмент поверхні ротора (сегмент). По мірі обертання ротора сканується кожен сегмент поверхні, внаслідок чого отримуємо тепловий портрет поверхні ротора гідрогенератора.

Коли радіальне биття валу ротора відсутнє інфрачервоні сенсори, що виходять за межі краю ротора, не приймають участі у формуванні теплового портрета ротора гідрогенератора.

За наявності радіального биття ротора на виходах інфрачервоних сенсорів, що виходять за межі краю простору обертання ротора, в залежності від інтенсивності биття з'являються в ряді сегментів сигнали, які свідчать про відхилення осі обертання валу ротора від її вертикального положення.

Очевидно, що чим більша амплітуда відхилення осі валу ротора від вертикального положення та чим в більший кількості сенсорів, що знаходяться в різних сусідніх сегментах поза межами краю ротора з'являються сигнали, які перевищують нижній поріг фіксації, тим більше зростає рівень радіального биття валу ротора гідрогенератора.

Сигнали з інфрачервоних сенсорів оброблюються за допомогою мікропроцесорного пристрою у відповідності до наведеного алгоритму функціонування. У разі фіксації факту наявності радіального биття оперативному персоналу видається попереджувальний сигнал. Вся інформація щодо вимірювання теплового портрета ротора гідрогенератора зберігається в базі оперативного персоналу, що дозволяє досліджувати процес погіршення технічного стану гідрогенератора.

Таким чином здійснюється оцінка рівня радіального биття ротора гідрогенератора, як альтернативний підхід до відомих традиційних систем контролю рівня радіального биття ротора.

Зроблено висновок про доцільність поєднання запропонованого пристрою з іншими системами моніторингу технічного стану гідроагрегатів.

Ключові слова: гідрогенератор, вал ротора, радіальне биття, оцінка технічного стану, тепловізійний метод.

GRABKO VOLODYMYR

GRABKO VALENTYN

OSCHERPKOV VICTOR

Vinnitsia National Technical University

MICROPROCESSOR DEVICE FOR ESTIMATING THE LEVEL OF RADIAL RUN OF A HYDROGENERATOR ROTOR BY THERMAL VISION METHOD

The paper proposes an approach that involves installing a line of infrared sensors along the radius of the hydrogenerator rotor with signals output from them to a microcontroller. Part of the specified line extends beyond the limits of rotation of the rotor edge. During the rotation of the rotor, at each moment of time, a small fragment of the rotor surface (segment) falls into the field of view of the infrared sensor array. As the rotor rotates, each segment of the surface is scanned, resulting in a thermal portrait of the hydrogenerator rotor surface.

When there is no radial runout of the rotor shaft, the infrared sensors extending beyond the rotor edge do not participate in forming the thermal portrait of the hydrogenerator rotor.

In the presence of radial rotor runout at the outputs of infrared sensors that extend beyond the edge of the rotor rotation space, depending on the intensity of the runout, signals appear in a number of segments indicating a deviation of the rotor shaft rotation axis from its vertical position.

It is obvious that the greater the amplitude of the deviation of the rotor shaft axis from the vertical position and the more signals that exceed the lower fixation threshold appear in the larger number of sensors located in different neighboring segments outside the rotor edge, the more the level of radial runout of the hydrogenerator rotor shaft increases.

Signals from infrared sensors are processed by a microprocessor device in accordance with the above operating algorithm. In case of fixing the fact of radial runout, a warning signal is issued to the operating personnel. All information regarding the measurement of the thermal portrait of the hydrogenerator rotor is stored in the database of operational personnel, which allows investigating the process of deterioration of the technical condition of the hydrogenerator.

In this way, the level of radial runout of the hydrogenerator rotor is assessed as an alternative approach to known traditional systems for monitoring the level of radial runout of the rotor.

A conclusion was made about the feasibility of combining the proposed device with other systems for monitoring the technical condition of hydraulic units.

Keywords: hydrogenerator, rotor shaft, radial runout, technical condition assessment, thermal imaging method.

Стаття надійшла до редакції / Received 02.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 24.05.2025

Вступ

Гідроелектростанції є важливою складовою в задачі електропостачання споживачів електроенергії. При цьому гідрогенератори в основному працюють в режимі покриття піків навантаження, наприклад, ранішнього та вечірнього максимумів навантаження [1, 2].

Очевидно, що в процесі експлуатації гідрогенератори, як і інше силове електрообладнання, втрачають свої технічні характеристики, внаслідок чого можливе погіршення їх функціонування, що може наблизити їх до аварійного режиму роботи. Причому, аварійні ситуації виникають не миттєво, а протягом тривалого часу з повільним погіршенням експлуатаційних параметрів гідрогенераторів.

Аналіз відомих рішень

Для контролю роботоздатності гідрогенераторів або моніторингу їх технічного стану використовуються різноманітні підходи, якими здійснюється перевірка роботоздатності за багатьма параметрами неперервно під час експлуатації або в періоди виведення генераторів для профілактичного огляду або поточних ремонтів [3].

Одним із видів пошкоджень, які виникають в процесі експлуатації гідрогенератора, є поява радіального биття ротора. Відомо, що за визначеним рівнем биття ротора гідрогенератора, можливо оцінити ще декілька інших дефектів, які в цілому погіршують роботу гідроагрегату [4].

Відомий ряд методів і засобів, які дозволяють оцінювати рівень радіального биття ротора гідрогенератора, зокрема шляхом застосування ємнісних сенсорів, акселерометрів, струмовихвихових сенсорів тощо з подальшою обробкою сигналів [5]. Кожен із них має свої переваги, обмеження та особливості застосування.

Постановка задачі

В даній роботі пропонується рівень радіального биття оцінювати тепловізійним методом. Сутність такого підходу така. Пропонується вздовж ротора гідрогенератора розташувати лінійку інфрачервоних сенсорів, яка виходить дещо за межі крайніх точок площини обертання ротора. В кожен момент часу в поле зору лінійки сенсорів потрапляє незначна частина (сегмент) ротора гідрогенератора. В процесі обертання ротора фіксуються сигнали з сенсорів в кожному сегменті, внаслідок чого формується тепловий портрет ротора. Інфрачервоні сенсори, що розташовані за межами ротора, за відсутності радіального биття ротора у формуванні теплового портрета участі не приймають. У разі появи радіального биття інфрачервоні сенсори, що розташовані за межами обмотки ротора, будуть відображати сигнали, що свідчать про відхилення краю ротора від своєї традиційної траєкторії руху. Звичайно, необхідно встановлювати поріг формування сигналів на виходах сенсорів, які сприймаються як сигнали логічного нуля або одиниці, з подальшою обробкою сигналів за допомогою обчислювальних засобів.

В роботі [6] представлена структура пристрою для визначення теплового портрета ротора з подальшим оцінюванням рівня радіального биття ротора, однак в ній суттєво обмежені функціональні можливості та рівень інформативності щодо наявності радіального биття.

Отже, наявність радіального биття ротора гідрогенератора можна представити у вигляді

$$\sum_j D_{ij} \geq F_i \quad (1)$$

за умови, що $T_{ij} \geq T_{ij \min}$, де j - номер інфрачервоного сенсора (пікселя), що знаходиться в лінійці інфрачервоних сенсорів, i - номер сегмента поверхні теплового портрета ротора гідрогенератора, T_{ij} – поточне значення температури j -ї точки в i -му сегменті вимірювання, $T_{ij \min}$ – найменше значення температури j -ї точки в i -му сегменті вимірювання, якою задається поріг вимірювання температури, D_{ij} - сигнал логічного нуля або одиниці, що відображає наявність сигналу температури вище порогу вимірювання температури в j -й точці в i -му сегменті вимірювання, F – кількість пікселів, яка задає поріг рівня фіксації сигналів з сенсорів та відображає появу радіального биття.

Аналогічно вираз

$$\sum_j D_{ij} < F_i \quad (2)$$

свідчить про відсутність радіального биття ротора гідрогенератора.

Приймемо також до уваги те, що при збільшенні амплітуди радіального биття кількість інформативних пікселів на одному i тому ж сегменті в кожному оберті ротора гідрогенератора зростатиме.

Формулювання цілі статті

Метою роботи є розробка мікропроцесорного пристрою для оцінювання рівня радіального биття ротора гідрогенератора.

Виклад основного матеріалу

Враховуючи невелику кількість обчислювальних операцій в задачі оцінювання рівня радіального биття ротора гідрогенератора, для розв'язання поставленої задачі можливо використати звичайний 8-розрядний мікроконтролер з достатньою кількістю портів, наприклад ATmega328 тощо [7].

Практика показує, що під'єднання інфрачервоних сенсорів до мікроконтролера краще здійснити через аналоговий регістр з паралельною фіксацією даних вимірювання температури, наступним перетворенням паралельного потоку даних в послідовний потік з послідовним перетворенням сигналу температури в цифрові сигнали логічного нуля або одиниці шляхом застосування компаратора.

Для відслідковування умовного початку відліку сегментів вимірювання температури необхідно в структуру пристрою ввести сенсор положення ротора з паралельним або послідовним виведенням цифрового сигналу.

У разі необхідності введенням початкових параметрів або інших операцій до мікроконтролера необхідно підключити дисплей та клавіатуру.

Застосування додаткових обсягів оперативної пам'яті можливе у разі необхідності збереження теплового портрета ротора протягом тривалого періоду спостереження. На нашу думку, логічніше використати інтерфейс для підключення мікроконтролера в систему моніторингу гідроагрегату для накопичення інформації та її аналізу експлуатаційним персоналом.

Для чергового персоналу з метою акцентування уваги потрібно в структурі пристрою передбачити місцеву сигналізацію.

Робота мікропроцесорного пристрою пояснюється так. Сигнали з лінійки 1 інфрачервоних сенсорів 1.1 – 1.n надходять на вхід аналогового буферного регістра 2 в паралельному вигляді, звідки через комутатор 3 послідовно через пристрій вибірки-зберігання 4 надходять в мікроконтролер 7 на внутрішній компаратор, внаслідок чого в пам'ять мікроконтролера записуються послідовності логічних сигналів нуля або одиниці в залежності від інтенсивності теплового випромінювання кожного пікселя поверхні ротора гідрогенератора.

Надходження сигналів з інфрачервоних сенсорів синхронізується подачею імпульсів з мікроконтролера 7, причому частота імпульсів, що подається в буферний регістр 2, визначається розміром сегмента поверхні ротора, який потрапляє в поле зору лінійки 1 інфрачервоних сенсорів. Частота імпульсів, що подається на комутатор 3 та пристрій вибірки-зберігання 4, перевищує частоту імпульсів, що подаються в буферний регістр 2 і визначається кількістю інфрачервоних сенсорів, що розташовані в лінійці 1.

При обертанні вала ротора гідрогенератора на виході сенсора положення 5 в послідовному коді формується послідовність імпульсів, яка подається в мікроконтролер 7 та свідчить про кут повороту ротора від умовного початкового положення. Запис інформації в пам'ять мікроконтролера 7 відбувається від умовного початкового положення ротора та повторюється після завершення повного оберту ротора.

Через блок узгодження сигналів 10 інформація з мікроконтролера 7 передається по каналу зв'язку в сервер або комп'ютер оперативного персоналу.

З врахуванням наведених міркувань структура мікропроцесорного пристрою наведена на рис. 1. На схемі: 1 – лінійка інфрачервоних сенсорів; 2 – буферний регістр; 3 – комутатор; 4 – пристрій вибірки-зберігання; 5 – сенсор положення; 6 – клавіатура; 7 – мікроконтролер; 8 – дисплей; 9 – блок індикації; 10 – блок узгодження сигналів для передачі їх оперативному персоналу.

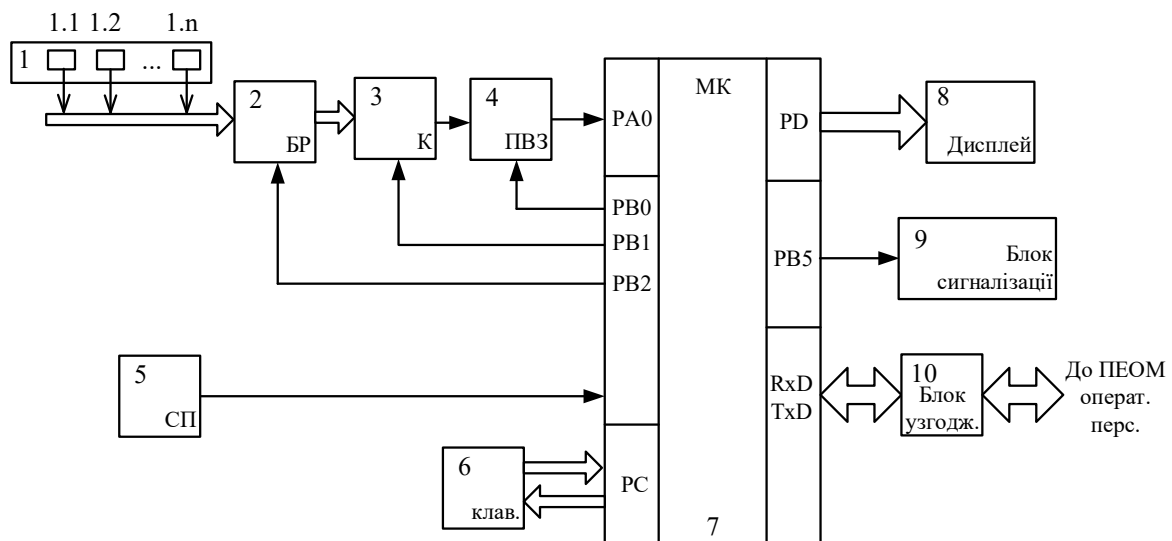


Рис.1. Структурна схема мікропроцесорного пристрою для оцінки рівня радіального биття ротора гідрогенератора

У відповідності до структурної схеми мікропроцесорного пристрою розроблено узагальнений алгоритм його функціонування, який наведено на рис. 2.

Для пояснення роботи в алгоритмі введені такі позначення: L – кількість сегментів поверхні ротора гідрогенератора; K – кількість інфрачервоних сенсорів (пікселів), що знаходяться в лінійці сенсорів 1; s – кількість сегментів, що межують між собою, в яких зафіксовано радіальне биття ротора; p – кількість обертів ротора протягом певного періоду спостереження; f_i – найбільша кількість пікселів в одному оберті ротора, що перевищує поріг фіксації появи радіального биття ротора.

Відповідно до розробленого алгоритму процес оцінювання рівня радіального биття ротора гідрогенератора здійснюється таким чином:

- в блоках 1 – 5 здійснюється ініціалізація та налаштування пристрою;
- в блоках 6, 7 відбувається опитування інфрачервоного ij -го сенсора та за сформованими умовами обирається подальший напрям виконання операцій;
- в блоках 8, 16 відбувається встановлення логічного нуля або одиниці в залежності від значення вимірної температури;
- в блоках 9, 20 відбувається перехід до опитування наступного сенсора;
- в блоках 10, 11 відбувається перехід до опитування сенсорів в наступному сегменті;
- в блоках 12, 13 відбувається перехід до опитування сенсорів в наступному колі обертання ротора;
- блоки 14, 15 описують завершення роботи;
- в блоках 17, 18 накопичується інформація щодо появи радіального биття ротора та порівняння з нижньою граничною межею;
- в блоках 19, 21 виводиться інформація щодо радіального биття ротора;
- в блоках 22, 23 відбувається збереження та перезапис інформації;
- в блоках 24 – 27 відбувається порівнювання даних та виведення інформації щодо розміру області радіального биття ротора;
- в блоках 28 – 31 відбувається порівнювання даних та виведення інформації щодо амплітуди радіального биття ротора;
- блоці 32 виводиться загальна інформація щодо параметрів радіального биття ротора гідрогенератора.

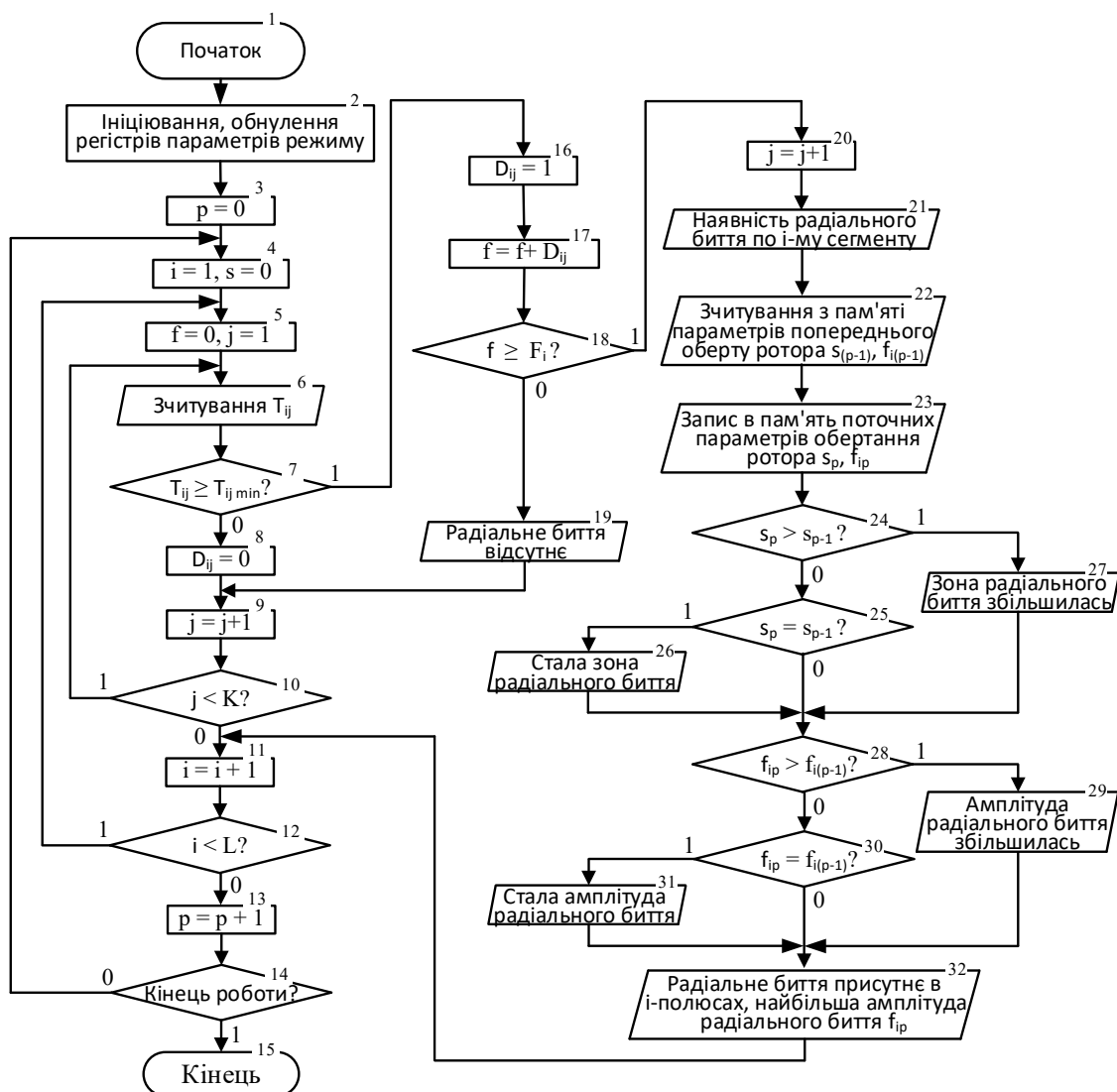


Рис.2. Узагальнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою для оцінки рівня радіального биття ротора гідрогенератора

Зауважимо, що якщо задачу оцінки рівня радіального биття ротора гідрогенератора поєднати з іншими задачами моніторингу, контролю, діагностування тощо в єдину мікропроцесорну систему, то для цього слід використати потужніший мікроконтролер, наприклад, із серії STM32 [8], в якому є

більша достатня кількість зовнішніх портів, функціональних можливостей та обчислювальної потужності.

Слід зазначити, що для підвищення достовірності оцінки рівня радіального биття ротора генератора можливо застосувати ще одну лінійку інфрачервоних сенсорів, розташувавши її по відношенню до встановленої в одній площині але повернутої на кут 90°.

Висновки

На основі запропонованого підходу та математичної моделі здійснена мікропроцесорна реалізація структури пристрою для оцінки рівня радіального биття ротора гідрогенератора. Розроблено алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою. Зроблено висновок про доцільність поєднання вказаної задачі з іншими задачами моніторингу технічного стану електрообладнання розподільчого пристрою електростанції.

Література

1. Кудря С.О. Відроджувальні джерела енергії. Монографія. Київ : Інститут відроджуваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.
2. Сегеда М. С. Електричні системи та мережі: Підручник / М. С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2015. – 540 с.
3. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Berezhnychenko V. Hybrid diagnostics systems for power generators faults: systems design principle and shaft run-out sensors. *Power systems research and operation: Selected problems* / editors: Kyrylenko O., Zharkin A. and other. Springer, 2021, P. 71 – 98.
4. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Березниченко В. О. Особливості вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валу гідроагрегату // Гідроенергетика України. – 2019. – №1-2. – С. 39–44.
5. Zaitsev I., Berezhnychenko V., Bajaj M., Taha I.B.M., Belkhier Y., Titko V., Kamel S. Calculation of capacitive-based sensors of rotating shaft vibration for fault diagnostic systems of powerful generators. *Sensors*. 2022. vol. 22(1634). 19 p.
6. Пат. 158182 UA, G01K 13/08 Пристрій для безконтактного вимірювання температури / В. В. Грабко, О. П. Чорний, В. В. Грабко, М. М. Мошноріз (Україна). № у 202401875; заявл.: 10.04.2024; опубл. 08.01.2025, Бюл. № 2.
7. ATMEGA328 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Atmega328> (Accessed: May 16, 2025).
8. STM32-E407 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/609366/ETC2/STM32-E407/1569/15/STM32-E407.html> (Accessed: May 16, 2025).

References

1. Kudrya S.O. Vidnovlyuvai'ni dzherela enerhiyi. Monohrafiya. Kyiv: Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NANU, 2020. – 392 s.
2. Segeda M. S. Elektrichni systemy ta merezhi: Pidruchnyk / M. S. Segeda. – L'viv: Vydavnytstvo Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politekhnik», 2015. – 540 s.
3. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Berezhnychenko V. Hybrid diagnostics systems for power generators faults: systems design principle and shaft run-out sensors. *Power systems research and operation: Selected problems* / editors: Kyrylenko O., Zharkin A. and other. Springer, 2021, P. 71 – 98.
4. Levyts'kyi A. S., Zaitsev YE. O., Berezhnychenko V. O. Osoblyvosti vymiryuvannya radial'noho byttya tsylindrychnykh poverkhon' valu hidroahrehatu // Hidroenerhetyka Ukrayiny. – 2019. – №1-2. – S. 39–44.
5. Zaitsev I., Berezhnychenko V., Bajaj M., Taha I.B.M., Belkhier Y., Titko V., Kamel S. Calculation of capacitive-based sensors of rotating shaft vibration for fault diagnostic systems of powerful generators. *Sensors*. 2022. vol. 22(1634). 19 p.
6. Patent Ukrainy №158182. Prystriy dlya bezkontaktnoho vymiryuvannya temperatury / V. V. Grabko, O. P. Chornyy, V. V. Grabko, M. M. Moshnoriz. № u 202401875; zaivl.: 10.04.2024; opubl. 08.01.2025, Biul. № 2.
7. ATMEGA328 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Atmega328> (Accessed: May 16, 2025).
8. STM32-E407 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/609366/ETC2/STM32-E407/1569/15/STM32-E407.html> (Accessed: May 16, 2025).