

УДК 681.518.3

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).31](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).31)**TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY LEVEL SENSOR FOR LIQUID AND GRANULAR MEDIA****РЕФЛЕКТОМЕТРИЧНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ РІВНЯ РІДКИХ ТА СИПКИХ СЕРЕДОВИЩ**

Yevhen O. Pryshchepov
yevhen.pryshchepov@nuos.edu.ua
ORCID: 0009-0003-7496-2907

Andrii P. Yeremenko
andrii.yeremenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8392-7623

Є. О. Прищепов,
старший викладач

А. П. Єременко,
старший викладач

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. In many industries, it is necessary to measure the storage parameters of liquid and granular materials. Among these parameters, one of the most important is the level. Accurate determination of the level is necessary to ensure safety, optimize production processes and reduce resource losses. This led to the development of a number of methods for measuring this parameter. One of the methods of measuring the level is the method of time-domain reflectometry, based on the analysis of the reaction of the object under investigation to a short probing voltage pulse. Level sensors, in terms of application for different media, are divided into level sensors for liquids and level sensors for granular materials. The time-domain reflectometry method makes it possible to develop a universal sensor for liquid and granular materials. However, the stroboscopic sampling method used in time-domain reflectometry sensors is difficult to implement and leads to errors. The development of a universal measuring sensor, that can measure the level of both liquid and granular media without the use of stroboscopic sampling method, is relevant.

Purpose. The development and practical implementation of a universal time-domain reflectometry level sensor, which can measure the level of both liquid and granular media without the use of stroboscopic sampling method, is the goal of this work.

Methods. Research methods are structural and parametric synthesis.

Results. The work describes the development and practical implementation of a universal time-domain reflectometry level sensor, which can measure the level of both liquid and granular media without the use of stroboscopic sampling method.

Scientific novelty. The scientific novelty of the developed level measuring sensor is that it is universal, that is, it can measure the level of both liquid and granular media.

Practical importance. The practical importance is the development of a universal measuring sensor that can measure the level of both liquid and granular media.

Key words: time-domain reflectometry; level measurement; stroboscopic sampling method; short-pulse; reflectogram; microcontroller; time-code converter.

Анотація. У багатьох галузях промисловості необхідно вимірювати параметри зберігання рідких та сипких середовищ. Серед цих параметрів одним із найважливіших є рівень. Точне вимірювання рівня необхідне для забезпечення безпеки, оптимізації виробничих процесів та зменшення втрат ресурсів. Це призвело до розробки цілого ряду методів вимірювання цього параметра. Одним із методів вимірювання рівня є метод імпульсної рефлектометрії, заснований на аналізі реакції об'єкта, що досліджується, на короткий зондуєчий імпульс напруги. Вимірювальні перетворювачі рівня, щодо застосування для різних речовин, діляться на перетворювачі рівня для рідини та перетворювачі рівня для сипких матеріалів. Метод імпульсної рефлектометрії дозволяє розробити універсальний вимірювальний перетворювач для рідких і сипких середовищ. Однак, метод стробоскопічного перетворення, що використовується у рефлектометричних вимірювальних перетворювачах, є складним у реалізації та призводить до помилок. Актуальною є розробка універсального вимірювального перетворювача, який може виміряти рівень як рідких, так і сипких середовищ без використання стробоскопічного перетворення.

Мета. Розробка та практична реалізація універсального рефлектометричного вимірювального перетворювача рівня, який може виміряти рівень як рідких, так і сипких середовищ без використання стробоскопічного перетворення є метою цієї роботи.

Методика. Методами дослідження є структурний та параметричний синтез.

Результати. У роботі описана практична реалізація універсального рефлектометричного вимірювального перетворювача рівня, який може виміряти рівень як рідких, так і сипких середовищ без використання стробоскопічного перетворення.

Наукова новизна. Наукова новизна розробленого вимірювального перетворювача рівня полягає у тому, що він є універсальним, тобто може виміряти рівень як рідких, так і сипких середовищ.

Практична значимість. Практичну цінність становить розробка універсального вимірювального перетворювача, який може виміряти рівень як рідких, так і сипких середовищ.

Ключові слова: імпульсна рефлектометрія; вимірювання рівня; метод стробоскопічного перетворення; короткий імпульс; рефлектограма; мікроконтролер; перетворювач «час-код».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У багатьох галузях промисловості, таких як хімічна, харчова, фармацевтична, енергетична та аграрна, необхідно вимірювати параметри зберігання рідких та сипких середовищ. Серед цих параметрів одним із найважливіших є рівень. Точне визначення рівня необхідне для забезпечення безпеки, оптимізації виробничих процесів та зменшення втрат ресурсів. Це призвело до розробки цілого ряду методів вимірювання цього параметра.

Вимірювальні перетворювачі рівня – первинні прилади в системах автоматизації. Вони використовуються для роботи з нафтою, нафтопродуктами, мастильними матеріалами, мастильно-охолоджуючими емульсіями, водою і водними розчинами, стічними водами, кислотами, миючими рідинами, харчовими продуктами, пластиковими гранулами, будівельними матеріалами, сухими будівельними сумішами, різними в'язкими середовищами.

Вимірювальні перетворювачі рівня, щодо застосування для різних речовин, діляться на перетворювачі рівня для рідини та перетворювачі рівня для сипких матеріалів [1]. Актуальною є розробка універсального вимірювального перетворювача, який може виміряти рівень як рідких, так і сипких середовищ.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Детальний огляд принципів дії та сфери застосування вимірювальних перетворювачів рівня рідких та сипких середовищ наведено у роботі [1].

Одним із методів вимірювання рівня є метод імпульсної рефлектометрії, заснований на аналізі реакції об'єкта, що досліджується, на короткий зондуючий імпульс напруги [2]. Під коротким імпульсом в даному випадку розуміється як імпульс наносекундної тривалості, так і більш тривалий імпульс з фронтом наносекундної тривалості. Реакція виявляється у появі відбитих від неоднорідностей об'єкта імпульсів. Застосування методу імпульсної рефлектометрії дозволяє розробити універсальний вимірювальний перетворювач, який може виміряти рівень як рідких, так і сипких середовищ.

На основі методу імпульсної рефлектометрії були розроблені різноманітні перетворювачі рівня рідких та сипких середовищ [3].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Метод стробоскопічного перетворення [4], що використовується у рефлектометричних вимірювальних перетворювачах для трансформації масштабу часу з наносекундного в мілісекундний діапазон, є складним у реалізації та призводить до похибок. Похибки виникають з огляду на те, що для визначення рівня необхідно вимірювати затримки відбитих імпульсів, а стробоскопічне перетворення впливає на точність цих вимірювань. Тому необхідно знайти альтернативу застосуванню методу стробоскопічного перетворення для вирішення задачі вимірювання рівня рідких та сипких середовищ методом імпульсної рефлектометрії.

У якості зондуючих імпульсів найчастіше використовуються «відеоім-пульс» і «перепад напруги». Більшість існуючих способів генерації зондуючих імпульсів засновано на використанні сучасних швидкодіючих напівпровідникових перемикаючих елементів – тунельних діодів, лавинних транзисторів, діодів з накопиченням заряду, в яких швидкість перемикавання визначається внутрішніми процесами в елементі [5].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка та практична реалізація універсального рефлектометричного вимірювального перетворювача рівня, який може виміряти рівень як рідких, так і сипких середовищ без використання стробоскопічного перетворення.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методами дослідження є структурний та параметричний синтез.

Об'єктом дослідження є рефлектометричний вимірювальний перетворювач рівня рідких та сипких середовищ.

Предметом дослідження є побудова рефлектометричного вимірювального перетворювача рівня

рідких та сипких середовищ без використання стробоскопічного перетворення, який може виміряти рівень як рідких, так і сипких середовищ.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Метод імпульсної рефлектометрії, стосовно задачі вимірювання рівня рідких та сипких середовищ, реалізується наступним чином. В електричну двопровідну лінію, що має в «сухому» вигляді повітряне заповнення між провідниками, надсилається зонduючий імпульс напруги (як правило, «відеоімпульс» або «перепад напруги»), який поширюється зі швидкістю:

$$\vartheta = c/\sqrt{\varepsilon}, \quad (1)$$

де c – швидкість електромагнітної хвилі у двопровідній лінії з повітряним заповненням між провідниками; ε – відносна діелектрична проникність середовища, яким заповнено простір між провідниками двопровідної лінії.

Знаменник формули (1) є коефіцієнтом укорочення електромагнітної хвилі:

$$\gamma = \sqrt{\varepsilon}. \quad (2)$$

Коефіцієнт укорочення електромагнітної хвилі γ показує, у скільки разів швидкість електромагнітної хвилі у лінії з відносною діелектричною проникністю ε середовища, яким заповнено простір між провідниками двопровідної лінії, менше, ніж у двопровідній лінії з повітряним заповненням між провідниками.

Середовище, що знаходиться у резервуарі, заповнює простір між провідниками двопровідної лінії. Хвильовий опір двопровідної лінії залежить від її геометричних розмірів, які є постійними, та від відносної діелектричної проникності заповнення між її провідниками. Тому хвильові опори ділянок двопровідної лінії, що знаходяться в контрольованому середовищі та в повітрі, відрізняються. В результаті на межі розділу «повітря-середовище» виникає стрибок хвильового опору від якого відбивається зонduючий імпульс.

Відстань від джерела зонduючих імпульсів (генератора) до стрибка хвильового опору пропорційна часу затримки відбитого імпульсу відносно зонduючого імпульсу:

$$L = 0,5 \cdot \vartheta \cdot t_d, \quad (3)$$

де t_d – час затримки відбитого імпульсу відносно зонduючого імпульсу.

Тому, знаючи висоту резервуара та час затримки відбитого імпульсу відносно зонduючого імпульсу, можна визначити рівень контрольованого середовища.

Характеристика, одержувана внаслідок зондування двопровідної лінії, називається рефлектограмою. Приклад рефлектограми при зондуванні відеоімпульсом наведено на рис. 1. Стрибок хвильового опору виникає не тільки на межі розділу «повітря-середовище», але і на розімкнутому нижньому кінці двопровідної лінії, що призводить до появи ще одного відбитого імпульсу.

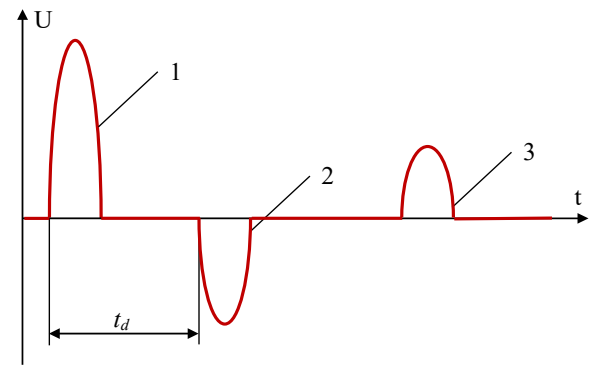


Рис. 1. Рефлектограма

На рис. 1 імпульс 2, відбитий від стрибка хвильового опору в двопровідній лінії на межі розділу «повітря-середовище», затриманий відносно зонduючого імпульсу 1 на час t_d . Значення t_d визначається відстанню від джерела зонduючих імпульсів до рівня контрольованого середовища. Імпульс 3 являє собою імпульс, відбитий від стрибка хвильового опору на розімкнутому нижньому кінці двопровідної лінії.

Замість застосування стробоскопічного перетворення для вимірювання затримок відбитих імпульсів пропонується використовувати інтегральний перетворювач «час-код» TDC-GP21 виробництва фірми «Sciosense» [6].

Конструктивно розроблений вимірювальний перетворювач рівня рідких та сипких середовищ без застосування стробоскопічного перетворення складається з наступних основних вузлів:

- електронна плата перетворювача (ЕПП);
- корпус перетворювача (КП);
- чутливий елемент перетворювача (ЧЕП).

ЕПП, що забезпечує реалізацію основних функцій вимірювального перетворювача, встановлена в КП, який захищає її від зовнішніх впливів. ЧЕП є електричною двопровідною лінією, в яку посиляється зонduючий імпульс. Він має безпосередній контакт з контрольованим середовищем.

Приклад розташування вимірювального перетворювача у резервуарі, що містить рідке або сипуче середовище, представлений на рис. 2.

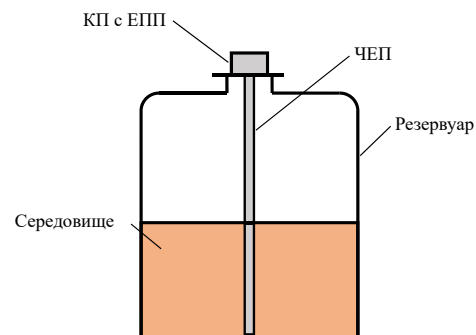


Рис. 2. Приклад розташування вимірювального перетворювача у резервуарі

Функціональна схема ЕПП представлена на рис. 3.

До складу функціональної схеми входять:

- перетворювач інтерфейсів (ПІ);
- мікроконтролер (МК);
- генератор зондуючих імпульсів (ГЗІ);
- джерело напруги зміщення (ДНЗ);
- джерело напруги порога (ДНП);
- компаратор (КМП);
- перетворювач «час-код» (ПЧК);
- перетворювач температури (ПТ);
- стабілізатор напруги 1 (СН1);
- перетворювач постійної напруги (ППН);
- стабілізатор напруги 2 (СН2).

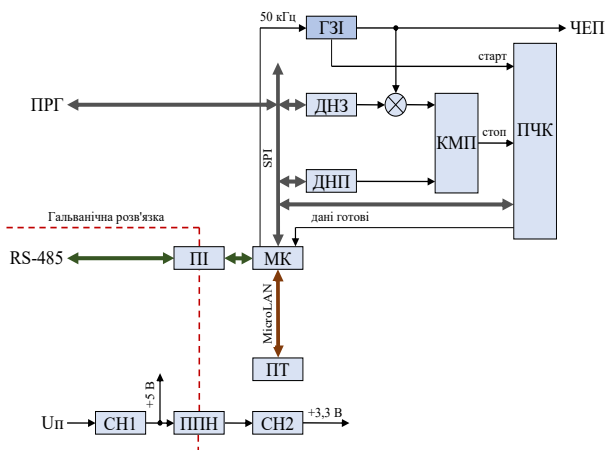


Рис. 3. Функціональна схема ЕПП

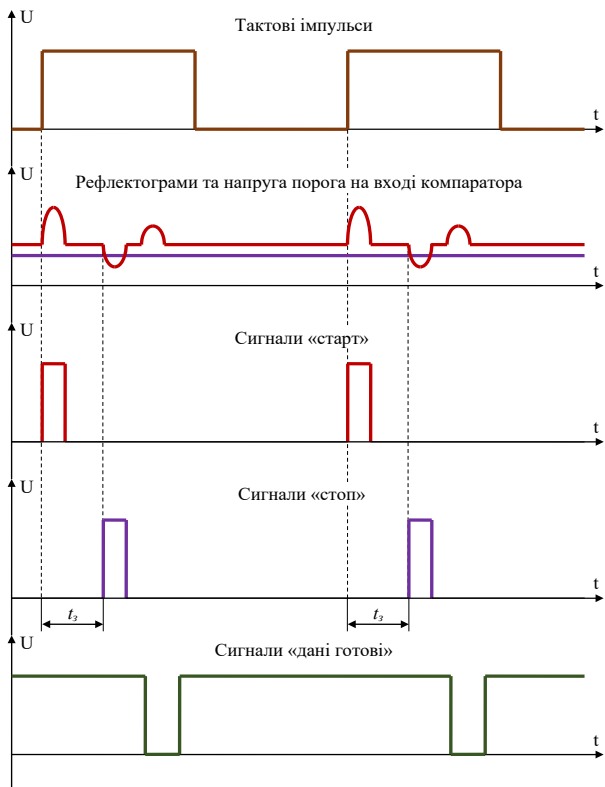


Рис. 4. Діаграма роботи ЕПП

МК ATtiny2313 виробництва фірми «Microchip» [7] призначений для управління вимірювальним процесом та організації підключення вимірювального перетворювача до мережі на основі інтерфейсу RS-485 [8] з підтримкою протоколу Modbus RTU [9]. ПІ служить для узгодження сигналів МК із сигналами інтерфейсу RS-485, забезпечуючи при цьому гальванічну розв'язку відповідних ланцюгів.

У процесі роботи МК постійно генерує тактові імпульси частотою 50 кГц, що запускають ГЗІ. ГЗІ, у свою чергу, генерує зондуючі імпульси, що посилаються в ЧЕП, і синхронно з кожним зондуючим імпульсом – сигнал «старт», що надходить на відповідний вхід ПЧК.

Рефлектограма, отримана в результаті зондування ЧЕП, підсумовується з постійною напругою зміщення, що формується ДНЗ, і подається на один із входів КМП. Підсумовування необхідне для зміщення рефлектограми у діапазон входних напруг КМП. На інший вхід КМП подається постійна напруга порога, що формується ДНП. При досягненні відбитим імпульсом напруги порога КМП генерує сигнал «стоп», що надходить на відповідний вхід ПЧК.

ПЧК вимірює затримку сигналу «стоп» відносно сигналу «старт», що відповідає затримці відбитого імпульсу відносно зондуючого імпульсу. Після закінчення вимірювання затримки ПЧК генерує сигнал «дані готові», що надходить на МК. Отримавши сигнал «дані готові», МК зчитує з ПЧК результат вимірювання затримки за допомогою інтерфейсу SPI [10].

Крім цього, за допомогою інтерфейсу SPI МК управляє роботою ДНЗ, ДНП та ПЧК. Інтерфейс SPI також використовується для підключення програматора (ПРГ) під час запису керуючої програми вимірювального перетворювача в МК.

Наявність ПТ на ЕПП дозволяє вносити поправку до результатів вимірювань залежно від температури навколишнього середовища, використовуючи відому функцію температурної корекції вимірювального перетворювача. ПТ підключається до МК з допомогою інтерфейсу MicroLAN [11].

СН1 забезпечує зниження напруги живлення U_p до стабілізованої напруги +5 В, призначеної для живлення ПІ з боку інтерфейсу RS-485. ППН призначений для забезпечення гальванічної розв'язки ланцюгів живлення вимірювального перетворювача. СН2 забезпечує зниження напруги +5 В до стабілізованої напруги +3,3 В, призначеної для живлення інших частин вимірювального перетворювача.

Діаграма роботи ЕПП представлена на рис. 4.

Зовнішній вигляд ЕПП представлено на рис. 5.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Метод імпульсної рефлектометрії, як один з методів вимірювання рівня, дозволяє створювати універсальні вимірювальні перетворювачі, які можуть



Рис. 5. Зовнішній вигляд ЕПП

застосовуватися як для вимірювання рівня рідких, так і сипких середовищ. Така універсальність дозволяє знизити витрати на розробку та підвищити рівень уніфікації цього класу вимірювальних перетворювачів.

Раніше, як зазначено в роботі [1], вимірювальні перетворювачі рівня рідких середовищ та вимірювальні перетворювачі рівня сипких середовищ мали різні конструкції і не були взаємозамінними.

ВИСНОВКИ

Розроблений рефлектометричний вимірювальний перетворювач рівня рідких та сипких середовищ має просту конструкцію і при цьому забезпечує досить високу точність вимірювань.

Завдяки відсутності рухомих частин та застосуванню сучасних технологій, гарантується проведення високонадійних вимірювань рівня навіть у складних технологічних умовах, таких як: присутність пилу, пари, турбулентності, утворення бульбашок, кипіння, наявність конструкційних деталей у резервуарі тощо. Конструкція вимірювального перетворювача забезпечує зручність монтажу, налаштування та дозволяє використовувати його, у тому числі, у малих резервуарах та в резервуарах зі складною конфігурацією.

Вимірювальний перетворювач оснащений послідовним цифровим інтерфейсом RS-485 з підтримкою протоколу Modbus RTU. Це забезпечує як об'єднання необхідного числа вимірювальних перетворювачів у мережу, так і їх інтеграцію у вже існуючі промислові мережі, які побудовані на основі вищезазначених стандартів.

REFERENCES

- [1] Tychkov, V.V., Halchenko, V.Ia., Trembovetska, R.V., Bazilo, K.V. (2020). [Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv. Tekhnichni zasoby avtomatyzatsii. Navchalno-metodychni posibnyk do praktychnykh robot dlia zdobuvachiv osvithnoho stupeniv "bakalavr" haluzi znan 15 "Avtomatyzatsiia ta pryladobudu-vannia" ta 18 "Vyrobnytstvo ta tekhnolohii" usikh form navchannia]. M-vo osvity y nauky Ukrainy, Cherkas. derzh. tekhnol. un-t. Cherkasy: ChDTU, p. 321. [in Ukrainian].
- [2] Andrews, J.R. (1994). [Time Domain Reflectometry. Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining]. Washington: Bureau of Mines, pp. 4–13.
- [3] Zhukov, Y.D., Gordeev, B.N., Greshnov, A.Y., Prischepov, E.O. (1997). [Onboard computer aided system for monitoring and control of stability affecting parameters. Proc. of the 6-th International Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB'97)]. Varna (Bulgaria), V. II. Pp. 239–245.
- [4] Zang, Xiaoxuan, Jianting Zhao, Yunfeng Lu, and Qing He. (2022). [Precision Measurement System of High-Frequency Signal Based on Equivalent-Time Sampling]. Electronics 11, № 13: 2098.
- [5] Bondarenko, I.M. (2019). [Mikroelektronika NVCh. Ch.2. Napivrovidnykovi elementy ta prystroi NVCh: navch. posibnyk dlia studentiv ZVO], Kharkiv: KhNURE, p. 172. [in Ukrainian].
- [6] Sciosense. (n.d.). TDC-GP21 ultrasonic flow converter. Retrieved May 5, 2025, from <https://www.sciosense.com/tdc-gp21-ultrasonic-flow-converter>.
- [7] Microchip Technology Inc. (n.d.). ATtiny2313. Retrieved May 5, 2025, from <https://www.microchip.com/en-us/product/attiny2313>.
- [8] Texas Instruments. (n.d.). SLLA272: Using the TDC1000-TDC7200EVM. Retrieved May 5, 2025, from <https://www.ti.com/lit/pdf/slla272>.
- [9] Modbus Organization. (n.d.). Modbus protocol specifications. Retrieved May 5, 2025, from <https://www.modbus.org>.
- [10] Wevolver. (n.d.). SPI protocol. Retrieved May 5, 2025, from <https://www.wevolver.com/article/spi-protocol>.
- [11] Analog Devices. (n.d.). MicroLAN. Retrieved May 5, 2025, from <https://www.analog.com/en/resources/glossary/microlan.html>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Тичков, В.В., Гальченко, В.Я., Трємбовецька, Р.В., Базіло, К.В. (2020). Автоматизація виробничих процесів. Технічні засоби автоматизації. Навчально-методичний посібник до практичних робіт для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» та 18 «Виробництво та технології» усіх форм навчання. М-во освіти та науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси: ЧДТУ, С. 321.
- [2] Andrews, J.R. (1994). Time Domain Reflectometry. Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining. Washington: Bureau of Mines, p. 4–13.
- [3] Zhukov, Y.D., Gordeev, B.N., Greshnov, A.Y., Prischepov, E.O. (1997). Onboard computer aided system for monitoring and control of stability affecting parameters. Proc. of the 6-th International Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB'97). Varna (Bulgaria), V. II. Pp. 239–245.

- [4] Zang, Xiaoxuan, Jianting Zhao, Yunfeng Lu, and Qing He. (2022). "Precision Measurement System of High-Frequency Signal Based on Equivalent-Time Sampling". Electronics 11, № 13: 2098.
- [5] Бондаренко, І.М. (2019). Мікроелектроніка НВЧ. Ч. 2. Напівпровідникові елементи та пристрої НВЧ: навч. посібник для студентів ЗВО, Харків: ХНУРЕ, С. 172.
- [6] TDC-GP21 Ultrasonic Flow Converter. URL: <https://www.sciosense.com/tdc-gp21-ultrasonic-flow-converter>.
- [7] ATtiny2313. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/attiny2313>.
- [8] The RS-485 Design Guide URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/slla272>.
- [9] Modbus. URL: <https://www.modbus.org>.
- [10] SPI Protocol: Revolutionizing Data Communication in Embedded Systems. URL: <https://www.wevolver.com/article/spi-protocol>.
- [11] MicroLAN. URL: <https://www.analog.com/en/resources/glossary/microlan.html>.

© Прищепов Є. О., Єременко А. П.
Дата надходження статті до редакції: 26.05.2025
Дата затвердження статті до друку: 09.06.2025