

УДК 621.3

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-143-151

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ У ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ

С.М. Дранчук

к.т.н., доцент кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4835-5594>

dranchuk.sergey@gmail.com

В.М. Машін

старший викладач кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0001-4950>

mashin@onmu.org.ua

О.В. Кочетков

к.т.н., доцент кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8200-4897>

33386242@ukr.net

В.І. Цацко

к.ф.-м.н, старший викладач кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8200-4897>

0679016767@ukr.net

Т.О. Гаур

старший викладач кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1251-2054>

mebarka7t@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. У роботі розглянуто особливості вимірювання частоти обертання двигуна електроприводу.

На основі аналізу розроблена структурна схема та алгоритм роботи пристрою, який дозволяє вимірювати частоту обертання двигуна за допомогою оптоелектронного датчика швидкості у перехідних процесах методом прямого підрахунку імпульсів зразкової частоти за змінний період вимірювання, який визначається кількістю виступів на датчику швидкості.

© Дранчук С.М., Машін В.М., Кочетков О.В., Цацко В.І., Гаур Т.О., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Проведено також експериментальне дослідження такого пристрою при вимірюванні змінення частоти обертання двигуна у перехідних процесах пуску.

Ключові слова: *оптоелектронний датчик швидкості, методи вимірювання частоти обертання двигуна, перехідні процеси електроприводу, мікроконтролер.*

UDC 621.3

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-143-151

INCREASING THE EFFICIENCY OF SHIP ELECTRIC POWER SYSTEMS USING PULSE ELECTRIC ENERGY CONVERTERS

Sergey Dranchuk

Ph.D., Associate Professor Department of «Marine power engineering,
physics, operation of electrical equipment»

Volodymyr Mashin

Senior Lecturer Department of «Marine power engineering,
physics, operation of electrical equipment»

Oleksandr Kochetkov

Ph.D., Associate Professor Department of «Marine power engineering,
physics, operation of electrical equipment»

Volodymyr Tsatsko

Ph.D, Senior Lecturer Department «Marine power engineering,
physics, operation of electrical equipment»

Tatyana Gaur

Senior Lecturer Department of «Marine power engineering,
physics, operation of electrical equipment»

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The paper considers the features of measuring the speed of an electric drive motor. Based on the analysis, a structural diagram and an algorithm for the operation of the device were developed, which allows measuring the engine speed using an optoelectronic speed sensor in transient processes by the method of direct counting of pulses of the sample frequency for a variable measurement period, which is determined by the number of protrusions on the speed sensor.*

An experimental study of such a device was also conducted when measuring changes in engine speed during transient starting processes.

Keywords: *optoelectronic speed sensor, methods for measuring engine speed, transient processes of an electric drive, microcontroller.*

Вступ. Дослідження перехідних процесів у електроприводу є дуже важливим, оскільки це дозволяє підвищити ефективність роботи електроприводу; швидкодію, точність встановленої координати, наприклад частоти обертання двигуна, налаштування електроприводу та ін.

Визначення швидкості обертання двигуна електроприводу ускладнюється малою кутовою частотою обертання двигуна на початку перехідного періоду пуску електроприводу. Це потребує наявності спеціальної кодуючої маски, яка б дозволила визначити частоту обертання двигуна не за повний оборот, а за зсувом на деякій фіксований кут. Але неточність виготовлення такої кодуючої маски підвищує похибку вимірювання. В даній роботі розроблений пристрій та алгоритм його роботи, який дозволяє усунути цей недолік.

Мета роботи. Розробка пристрою та алгоритму його роботи, який дозволяє вимірювати частоту обертання двигуна електроприводу у перехідних процесах з точністю до 1 % на мінімальній швидкості на початку пуску до 50 об/хв.

Викладення основного матеріалу. В наступний час для вимірювання кута обертання валу двигуна поширено використовують енкодери [1]. Енкодер – датчик, який визначає положення або швидкість обертання шляхом підрахунку прямокутних імпульсів, що генеруються при проходженні міток або візерунків на диску або колесі, прикріпленому до валу двигуна. Оптичні енкодери використовують джерела світла і фотоприймачі (рис. 1), тоді як магнітні енкодери використовують магнітні поля і датчики.

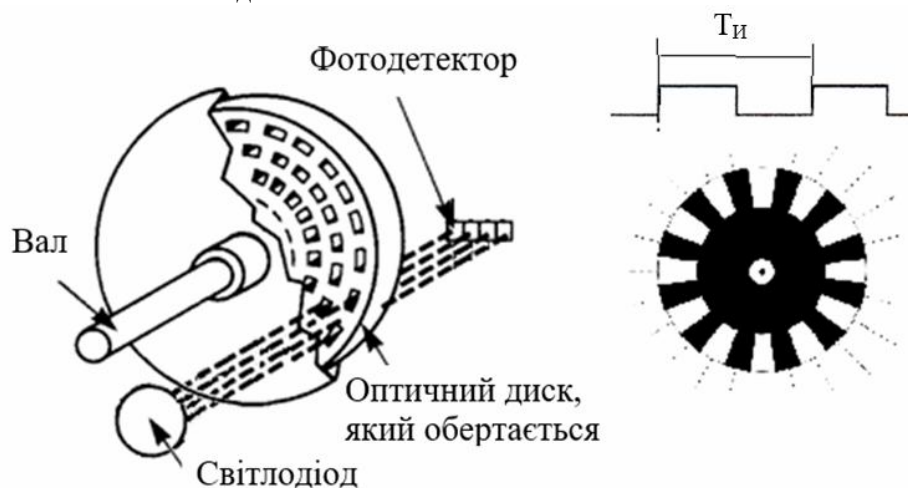


Рис. 1. Конструкція оптичного енкодера

Швидкість обертання двигуна визначається за заміром періоду прямокутного імпульсу $T_{\text{и}}$ між двома сусідніми виступами на оптичному диску, який обертається за формулою [2]

$$n[\text{об/хв}] = \frac{60}{T_{\text{и}} \cdot m}, \quad (1)$$

де m – кількість імпульсів на оптичному диску, який обертається.

Період прямокутного імпульсу між двома сусідніми виступами на оптичному диску можливо визначити методом прямого підрахунку імпульсів зразкової частоти N_0 з періодом T_0 [2]. Тоді швидкість обертання двигуна визначається з

$$n[\text{об} / \text{хв}] = \frac{60}{T_0 \cdot N_0 \cdot m} . \quad (2)$$

Якщо задатися періодом тактової частоти 5 мкс (200 кГц), то при максимальній швидкості обертання 3000 об/хв та $m = 12$ кількість імпульсів зразкової частоти складе 333 імпульси, а точність вимірювання буде не більш 0,3 % незалежно від точності виконання оптичного диску.

Якщо задатися мінімальною швидкістю обертання двигуна 50 об/хв, то кількість імпульсів зразкової частоти складе 20000 імпульсів, а інтервал вимірювання досягне 0,1 с., що достатнє для оцінки перехідних процесів електроприводу.

Структурна схема пристрою. Структурна схема пристрою вимірювання частоти обертання двигуна електроприводу у перехідних процесах наведена на рис. 2.

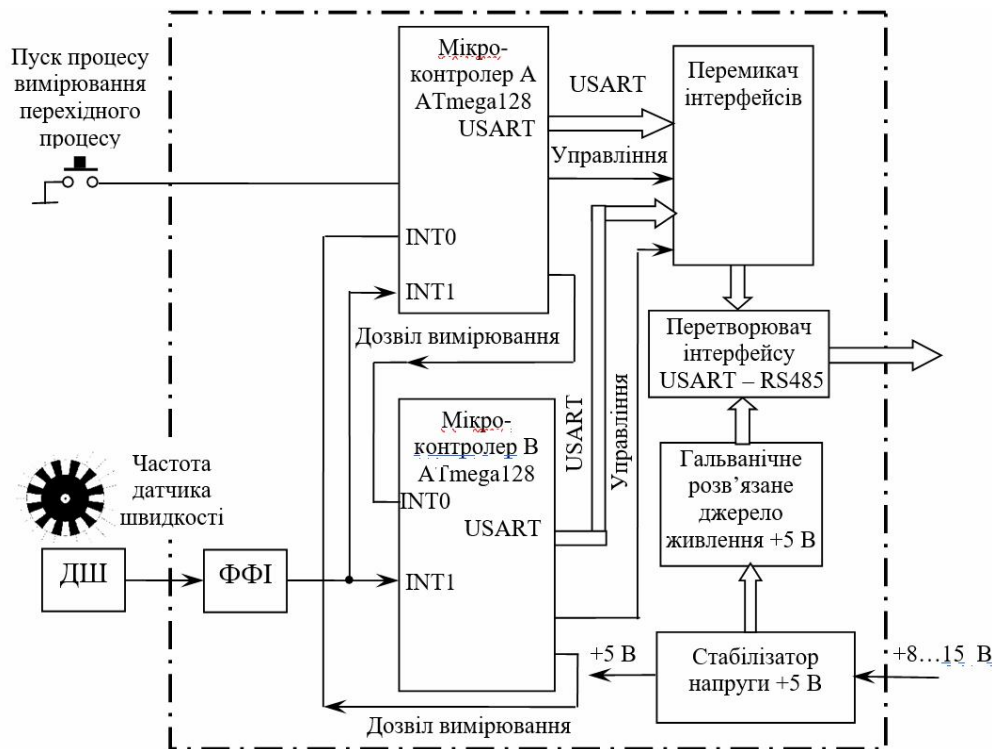


Рис. 2. Структурна схема пристрою вимірювання перехідних процесів у двигуні електроприводу

Структурна схема складається з наступних елементів:

1. Датчик швидкості (ДШ), який може бути оптоелектронним або магнітоіндуктивним. Вихідним сигналом такого датчика є частотний сигнал, частота якого пропорційна швидкості обертання двигуна. Кількість періодичних імпульсів в такому датчику складає 12 шт. Тобто можливо вимірювання частоти обертання двигуна електроприводу не за повний оборот валу, а за 1/12 обороту.

2. Формувач фронту імпульсів (ФФІ), задачею якого є перетворення розтягнутого фронту імпульсу від датчика швидкості у прямокутну форму з різкими фронтами (сигнал типу меандр). Фронт цього імпульсу визначає початок вимірювання періоду поточного частотного сигналу від датчика швидкості методом прямого підрахунку імпульсів зразкової частоти. Цей сигнал поступає на зовнішні переривання INT1 мікроконтролерів А та В, по якому один з контролерів (якому це у цей момент дозволено) починає цикл вимірювання. Це дає змогу проводити вимірювання безперервно у часі [4].

3. Мікроконтролери А та В. У якості цих мікроконтролерів використовуються однакові мікроконтролери типу ATmega128 з тактовою частотою 16 МГц [5]. Ці мікроконтролери працюють почергово: коли один мікроконтролер починає цикл вимірювання частоти, то інший мікроконтролер виконує обробку попереднього вимірювання частоти і передає отримані дані по інтерфейсу USART. Синхронізація такої роботи мікроконтролерів виконується по фронту сигналу на зовнішнє переривання INT0, який приходить від мікроконтролера, що виконує поточний вимір, і забороняє іншому мікроконтролеру проводити вимірювання.

4. Перемикач інтерфейсів USART мікроконтролера А та В, що дозволяє використовувати єдиний канал передавання отриманих даних.

5. Перетворювач інтерфейсу USART у інтерфейс типу RS485, який дозволяє передавати отримані дані у персональний комп'ютер для подальшої їх обробки на значну відстань.

6. Для живлення інтерфейсу типу RS485 використовується гальванічне розв'язане джерело живлення напругою 5В.

7. Загальне живлення пристрою виконується за допомогою стабілізатора напруги 5 В.

8. Кнопка ПУСК дозволяє почати процес вимірювання циклу перехідного періоду двигуна електроприводу.

Алгоритм роботи пристрою. Алгоритм роботи пристрою для мікроконтролера А наведений на рис. 3.

Після отримання сигналу на початок вимірювання перехідного процесу від кнопки ПУСК (початок вимірювання) або від мікроконтролера Б по зовнішньому перериванню INT1 (продовження вимірювання) скидається таймер Т3, який визначає загальний час вимірювання перехідного процесу пуску двигуна і фіксується $N_{зпоч} = 0$. Далі очікується з переривання INT1 прихід фронту імпульсу від датчика обертання, який визначає початок підрахунку імпульсів зразкової частоти. Скидається кількість імпульсів зразкової частоти, кількість яких визначається таймером Т0.

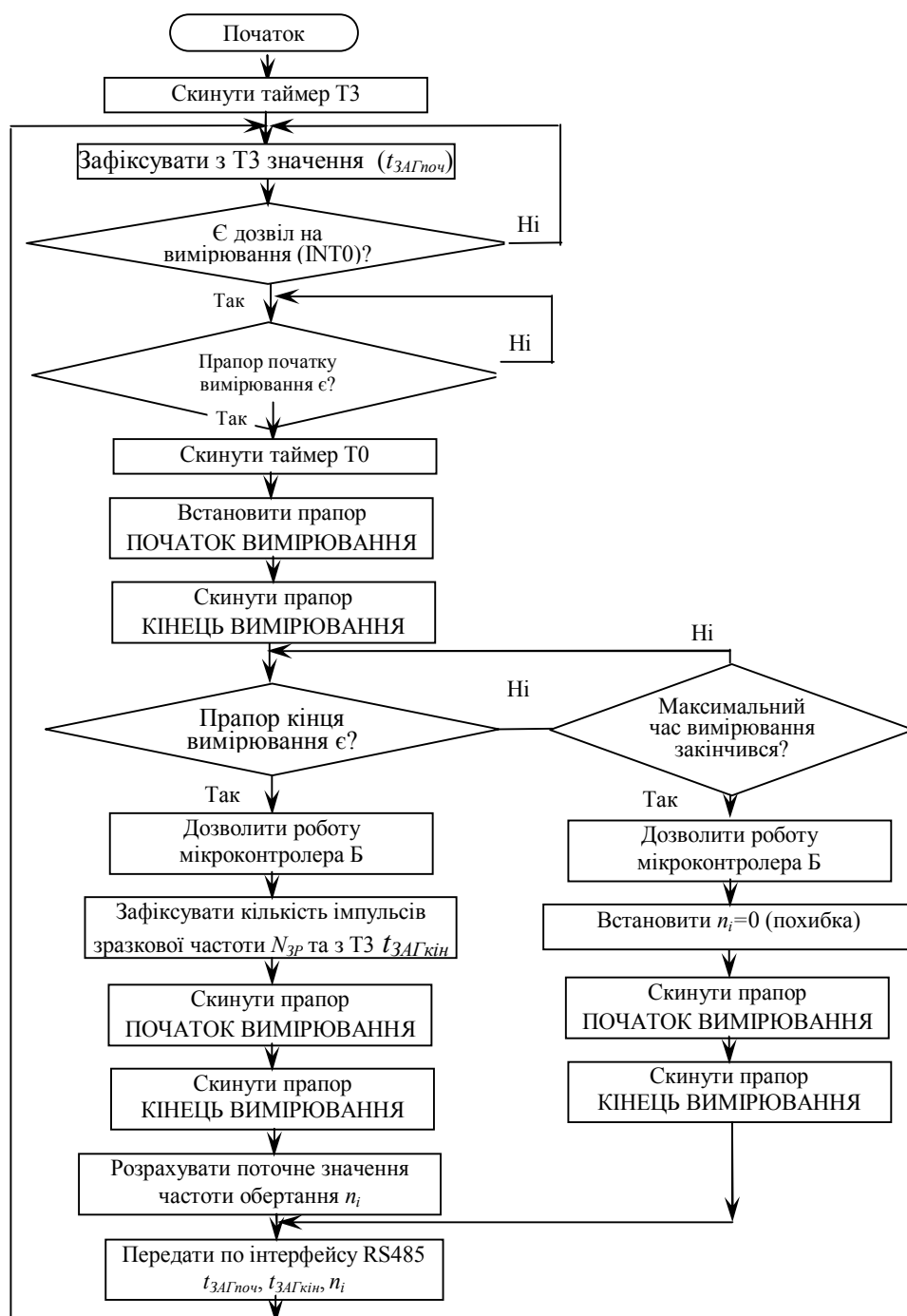


Рис. 3. Загальний алгоритм роботи пристрою

Скидається таймер $T1$, який визначає максимальну тривалість часу вимірювання частоти від датчика швидкості (100 мс). Встановлюється прапорець ПОЧАТОК ВИМІРЮВАННЯ, скидається прапорець КІНЕЦЬ ВИМІРЮВАННЯ. Мікроконтролер переходить у режим очікування закінчення вимірювання тривалості періоду, що визначається або встановленням прапорця КІНЕЦЬ ВИМІРЮВАННЯ по перериванню INT1 (прихід наступного фронту імпульсу від датчика обертання – вимірювання періоду частоти закінчено вдало), або приходом сигналу від таймера $T1$, що визначає досягнення максимального часу вимірювання періоду частоти від датчика швидкості (заміряти період частоти не вдалося).

Якщо вимірювання пройшло вдало, то мікроконтролер А переходить до обробки отриманих даних і дозволяє роботу мікроконтролера Б, який починає новий цикл вимірювання. Фіксується кількість нарахованих імпульсів зразкової частоти $N_{зр}$ з таймера $T0$, які визначають час періоду від датчика швидкості. Фіксується кількість нарахованих імпульсів $N_{зкін}$ з таймера $T3$, які визначають загальний час завершення вимірювання перехідного процесу пуску двигуна.

Скидається прапорець ПОЧАТОК ВИМІРЮВАННЯ та прапорець КІНЕЦЬ ВИМІРЮВАННЯ. Розраховується поточне значення швидкості обертання двигуна n_i за отриманими даними $N_{зр}$ згідно (1). Далі отримані дані $N_{зпоч}$, $N_{зкін}$, n_i у символьному вигляді передаються по інтерфейсу RS485 у комп'ютер для аналізу перехідного процесу. А мікроконтролер А переходить у режим очікування наступного вимірювання частоти від мікроконтролера Б по зовнішньому перериванню INT1.

Якщо вимірювання періоду частоти від датчика швидкості не вдалося (частота обертання двигуна менш 50 об/хв), то дозволяється робота мікроконтролера Б, який продовжує вимірювання. Значення швидкості обертання двигуна n_i приймається рівним 0. Фіксується кількість нарахованих імпульсів зразкової частоти $N_{зр}$ з таймера $T0$, які визначають час періоду від датчика швидкості.

Фіксується кількість нарахованих імпульсів $N_{зкін}$ з таймера $T3$, які визначають загальний час завершення вимірювання перехідного процесу пуску двигуна. Скидається прапорець ПОЧАТОК ВИМІРЮВАННЯ та прапорець КІНЕЦЬ ВИМІРЮВАННЯ. Далі отримані дані $N_{зпоч}$, $N_{зкін}$, $n_i = 0$ у символьному вигляді передаються по інтерфейсу RS485 у комп'ютер для аналізу перехідного процесу. А мікроконтролер А переходить у режим очікування наступного вимірювання частоти від мікроконтролера Б по зовнішньому перериванню INT1.

Таким чином забезпечується безперервний процес заміру швидкості обертання двигуна електроприводу у перехідному періоді його пуску.

Експериментальні результати. Розроблений пристрій був протестований при пуску асинхронного двигуна малоінерційного електроприводу з частотою обертання холостого руху 1500 об/хв, потужністю 1 кВт, який був налаштований на технічний оптимум. Зміна частоти обертання двигуна за перехідний період пуску при навантаженні менш номінального наведена на рис. 4.

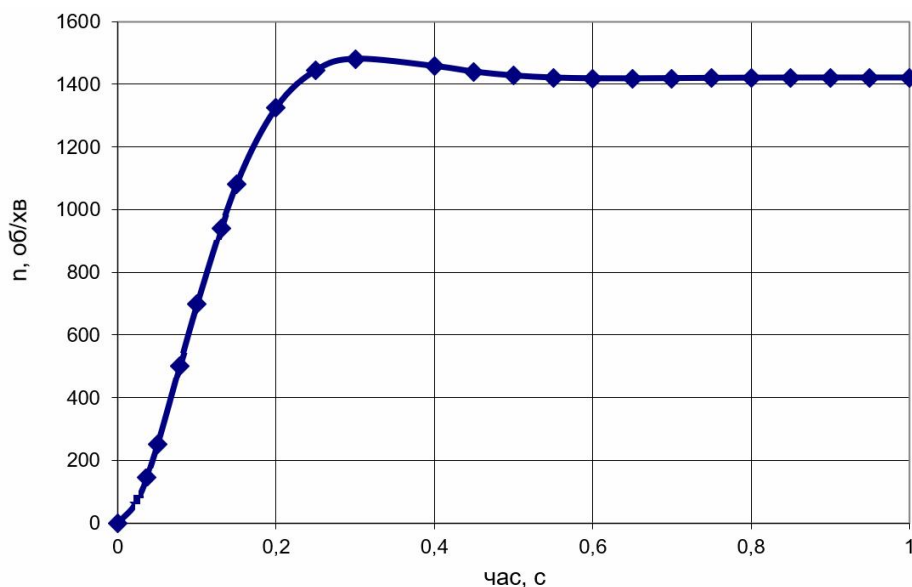


Рис. 4. Залежність змінення швидкості обертання двигуна у часі у перехідному процесі пуску електропривода

У якості датчика швидкості використовувався оптоелектронний датчик швидкості з 12 виступами на оптичному диску.

Для вимірювання періоду використовувалися імпульси зразкової частоти з періодом 5 мкс (200 кГц). Швидкість передавання отриманих даних у персональний комп'ютер по інтерфейсу RS485 складала 19500 Бод/с.

Перша точка заміру мала частоту обертання двигуна 95,8 об/хв, час виміру склав 0,087 с. Після виходу швидкості двигуна на стаке положення 1420 об/хв час вимірювання скоротився до 0,005 с.

Похибка виміру частоти обертання першої точки виміру склала 0,07 %, а похибка при вимірюванні сталої швидкості 1420 об/хв збільшилася до 1,4 %.

Таким чином розроблений пристрій дозволяє проводити вимірювання частоти обертання двигуна методом прямого підрахунку імпульсів зразкової частоти за період переміщення 1 виступу на датчику швидкості. Цей період вимірювання змінювався в залежності від швидкості обертання двигуна від 0,005 с до 0,087 с.

Висновки. Розроблений пристрій для визначення змінення частоти обертання двигуна електроприводу у перехідних процесах. Розроблені структурна схема та алгоритм роботи цього пристрою. Заміри частоти обертання двигуна проводилися методом прямого підрахунку імпульсів зразкової частоти за період зрушення 1 виступу на оптоелектронному датчику швидкості, який змінювався в залежності від швидкості обертання двигуна.

Подальше удосконалення цього пристрою пов'язане з підвищенням точності вимірювання частоти обертання двигуна при його великих значеннях. Для цього треба удосконалити алгоритм виміру частоти – при низьких частотах обертання двигуна для виміру періоду слід використовувати 1 виступ датчика швидкості, а на великих частотах обертання використовувати 2 або 3 виступи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. What is encoder? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://stl-grupp.com/info/what-is-encoder.html> (дата звернення: 12.03.2026).
2. Versatile digital speedometer uses few components [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.radiolocman.com/shem/schematics.html?di=34953> (дата звернення: 12.03.2026).
3. Кичак В.М., Стронський В.В., Белов В.С. Електрорадіовимірювання. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 90 с.
4. Дранчук С.М., Завадський В.А., Харченко Р.Ю. Моніторинг швидко змінних у часі процесів в суднових машинах з подальшим аналізом результатів // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2019. – № 31 (107). – С. 118-127.
5. ATmega128 datasheet [Електронний ресурс] / Atmel Corporation. – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/56260/ATMEL/ATMEGA128.html> (дата звернення: 12.03.2026).

REFERENCES

1. What is encoder? Available at: <https://stl-grupp.com/info/what-is-encoder.html> (accessed 12 March 2026).
2. Versatile digital speedometer uses few components. Available at: <https://www.radiolocman.com/shem/schematics.html?di=34953> (accessed 12 March 2026).
3. Kychak, V.M., Stronskyi, V.V., Bielov, V.S. (2017). Electroradiomeasurements. Vinnytsia: VNTU, 90 p.
4. Dranchuk, S.M., Zavadskyi, V.A., Kharchenko, R.Yu. (2019). Monitoring of fast-changing processes in ship machines with further analysis of results. Electrotechnical and Computer Systems, No. 31 (107), pp. 118-127.
5. Atmel Corporation. ATmega128 Datasheet. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/56260/ATMEL/ATMEGA128.html> (accessed 12 March 2026).

Дата надходження статті: 21.04.2026

Дата прийняття статті: 23.04.2026

Дата публікації статті: 16.06.2026