

ТИХЕНКО МАКСИМНаціональний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»e-mail: dk11.tyhenko@iit.kpi.ua**БОНДАРЕНКО ВІКТОР**Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»<https://orcid.org/0000-0003-1663-4799>e-mail: vicnbondarenko@gmail.com**БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ**Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»<https://orcid.org/0000-0002-9237-8187>e-mail: nalbondarenko@gmail.com

ВИСОКОНАДІЙНИЙ МОДУЛЬ ВВОДУ-ВИВОДУ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У статті представлено розробку модуля вводу-виводу, призначеного для використання у промислових автоматизованих системах з підвищеними вимогами до надійності та безпеки. Особливу увагу приділено проблемі захисту дискретних входів від випадкового потрапляння високої напруги (~220 В), що особливо актуально в умовах нестабільного електропостачання. Проведено огляд сучасних рішень, розглянуто архітектуру пристрою, принципи його роботи, а також визначено перспективи вдосконалення пристрою у напрямку бездротової передачі даних.

Ключові слова: промислова автоматизація, модуль вводу-виводу, захист від перенапруги, гальванічна розв'язка, RS-485, Modbus RTU, бездротовий зв'язок.

TYKHENKO MAKSYM**BONDARENKO VIKTOR****BONDARENKO NATALIA**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

HIGHLY RELIABLE I/O MODULE FOR INDUSTRIAL AUTOMATION

The article provides an in-depth exploration and practical implementation of the input-output module, designed to meet the heightened demands of industrial automation systems. Distinguished by its robust multi-stage overvoltage protection, the module safeguards discrete inputs against accidental exposure to mains voltage (~220 V), a significant risk in environments prone to unstable power supplies and industrial disturbances. This key feature ensures the safety of equipment and personnel. The introduction underscores the growing importance of resilient and adaptable I/O systems in the context of Industry 4.0, where seamless integration and uninterrupted operation are mission-critical. The paper evaluates several existing solutions – ICP DAS I-7053, Advantech ADAM-4050, and MK110-4DN.4R – emphasizing their limitations in surge protection and diagnostics. This analysis sets the foundation for the proposed innovative approach, combining a powerful STM32F103C8T6 microcontroller, galvanic isolation, RS-485/Modbus RTU communication, and advanced diagnostics via Serial Wire Debug. The hardware employs a tiered protection system with varistors, TVS diodes (SMBJ24A), and relays that disconnect circuits under hazardous conditions. Extensive lab tests validated the module's ability to maintain stable communication, filter input noise effectively, and recover autonomously from fault conditions. LED indicators provide real-time feedback on operational states and emergency events. Future improvements include the adoption of LoRa or Zigbee wireless modules (e.g., E220-900T22D), which will enable cable-free deployment across complex sites, reduce installation costs, and increase the flexibility of the automation system. The proposed input-output module thus presents a comprehensive solution addressing key gaps in the current market, making it highly suitable for critical infrastructure and safety-focused industries.

Keywords: industrial automation, input-output module, surge protection, galvanic isolation, RS-485, Modbus RTU, wireless communication.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Вступ

У сучасних умовах автоматизація виробничих процесів стає не просто інструментом підвищення продуктивності, а критичною необхідністю для забезпечення стабільності та безпеки виробництва. Автоматизація охоплює широкий спектр завдань – від моніторингу технологічних процесів до дистанційного керування обладнанням – і потребує застосування надійних електронних модулів. Модулі вводу-виводу (МВВ) є ключовими елементами таких систем, оскільки саме вони забезпечують з'єднання сенсорних пристроїв з логікою управління [1].

Особливо актуальним є питання підвищення захисту таких пристроїв у зв'язку з нестабільним електропостачанням, високим рівнем електромагнітних завад і зростанням кількості аварійних ситуацій, що виникають у критичній інфраструктурі. Більшість бюджетних, і навіть дорогих, модулів на ринку не мають повноцінного захисту від випадкового потрапляння напруги 220 В у кола дискретних входів, що призводить до частих відмов у роботі пристроїв. Крім того, існує обмеженість у налаштуваннях фільтрації сигналів і керуванні виконавчими механізмами.

Тому актуальним є створення універсального рішення, яке поєднає в собі апаратний захист, гнучкі налаштування і сумісність з поширеними протоколами зв'язку. В результаті розробки такого рішення створено пристрій MBV-4-2, що забезпечує підвищений рівень надійності, гнучкості та безпеки для використання у промислових системах автоматизації, зокрема у важких і нестабільних умовах експлуатації.

Вимоги до модулів дискретного вводу-виводу

Для стабільної роботи у виробничих умовах пристрій MBV має забезпечувати:

- стабільне зчитування сигналів типу «сухий контакт» [2];
- ефективну фільтрацію «брязкоту» контактів;
- гнучке керування виконавчими механізмами;
- повну електричну розв'язку;
- індикацію робочих станів;
- обмін даними через промислові протоколи, такі як RS-485/Modbus RTU [3].

Аналіз існуючих рішень

На ринку представлені численні модулі з різною функціональністю. Наприклад, модуль VRC-R2 [4] вирізняється простотою та низькою ціною, але не має захисту від перенапруги, що обмежує його використання в умовах нестабільного електропостачання. Більш просунутий МК110-4ДН.4Р [5] реалізує частковий захист, однак його функціонал не є достатнім для забезпечення повноцінної безпеки при випадковому попаданні високої напруги. Порівняння основних характеристик MBV-4-2 і аналогічних рішень на ринку представлено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння основних характеристик MBV-4-2 і аналогічних рішень на ринку

Характеристика	MBV-4-2	МК110-4ДН.4Р	VRC-R2
Кількість дискретних входів	4	4	2
Кількість дискретних виходів	2	4	2
Інтерфейс зв'язку	RS-485	RS-485	RS-485
Протокол зв'язку	Modbus RTU	Modbus RTU, ASCII, DCON	Modbus RTU
Захист входів від 220 В	Є	Немає	Немає
Монтаж на DIN-рейку	Є	Є	Є
Напруга живлення	20-36	~90-264 В	7-30 В

Таким чином, навіть дорогі рішення не гарантують комплексного захисту, що стало поштовхом для розробки пристрою MBV-4-2 із повноцінним електронним бар'єром і візуальною індикацією аварійного стану.

Архітектура пристрою MBV-4-2

MBV-4-2 включає блок захисту від перенапруги, мікроконтролер для обробки сигналів, інтерфейси UART[6] і RS-485[1], блок індикації, а також дискретні входи та виходи з підтримкою гальванічної розв'язки. Архітектура доповнена технологічним роз'ємом з підтримкою Serial Wire Debug (SWD) для діагностики і програмування [7].

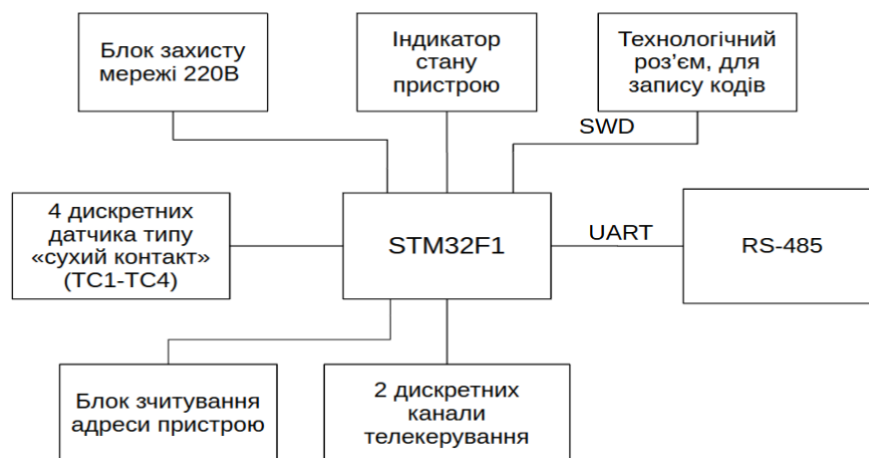


Рис. 1. Структурна схема пристрою MBV-4-2

Опис роботи пристрою MBV-4-2

Після подачі живлення пристрій MBV-4-2 виконує кілька послідовних етапів ініціалізації. Спочатку зчитується адреса модуля. Потім контролюється наявність конфігурацій у флеш-пам'яті мікроконтролера STM32F1: якщо конфігурація коректна, вона використовується для налаштування

комунікаційних параметрів (швидкість обміну, паритет, час затримки) та параметрів обробки сигналів; у разі її відсутності – застосовуються стандартні налаштування.

Після ініціалізації пристрій активує телекерувані виходи, відповідно до останнього збереженого стану. Для обробки сигналів запускається таймер з періодом 1 мс, що забезпечує циклічне опитування дискретних входів типу «сухий контакт». Зчитані сигнали проходять програмну обробку: фільтрація «брязкоуту» контактів, врахування налаштувань інверсії сигналів. Усі стани зберігаються у внутрішніх буферних регістрах, що дозволяє передавати їх через Modbus (функції 2, 3, 4). Керування виходами здійснюється через Modbus: функція 5 (імпульсне) та функція 6 (статичне). Стани телекерування зберігаються і автоматично відновлюються після перезавантаження. Для діагностики стану пристрою передбачено світлодіод Work: у нормальному режимі він блимає 1 раз на 3 секунди; при аварії – 3 рази на секунду; при очищеній пам'яті – коротке миготіння з тривалою паузою. Додатково реалізовано дистанційне перезавантаження через Modbus (функція 16) і Watchdog для автоматичного скидання при втраті зв'язку.

Отже, пристрій автоматично зчитує налаштування при ввімкненні, визначає адресу, ініціалізує параметри обробки сигналів і запускає моніторинг дискретних входів. Завдяки використанню Modbus RTU, забезпечується стабільний обмін даними з верхнім рівнем управління. Захист від перенапруги активується автоматично при виявленні небезпечного стану мережі, а вбудовані світлодіоди надають чітку індикацію аварійних режимів.

Тестування пристрою MBV-4-2

Процес тестування розпочався ще на етапі розробки програмного забезпечення. Основну увагу приділено перевірці коректності зчитування сигналів від дискретних датчиків типу «сухий контакт». Для цього до входних ліній підключалися тестові контактні пари, які моделювали замикання та розмикання. У режимі реального часу відстежувався стан входів, а також оцінювалась ефективність алгоритмів фільтрації «брязкоуту» контактів. Паралельно відпрацьовувалась логіка телекерування, зокрема як імпульсна, так і статична реалізація команд керування на вихідні канали. Для візуального контролю використовувалися світлодіодні індикатори та програмні діагностичні журнали, що давали змогу оперативно виявляти внутрішні події та потенційні помилки в логіці керування.

Після завершення етапу розробки програмного забезпечення проведено комплексне тестування модуля в умовах, наближених до реальної експлуатації. Протягом одного тижня пристрій працював у безперервному режимі з використанням симулятора протоколу Modbus, який генерував постійні запити на зчитування станів входів. Це дозволило перевірити стабільність зв'язку, обробку протокольних запитів, а також виявити можливі логічні помилки або програмні «зависання».

Для забезпечення надійності в модулі реалізовано механізм автоматичного перезавантаження (WatchDog). У випадках збоїв, пов'язаних з обміном по Modbus, зчитуванням дискретних входів або виконанням телекеруючих команд, система ініціює автоматичне перезавантаження, що гарантує відновлення працездатності без втручання оператора.

Завершальне тестування проводилось на лабораторному стенді з імітацією типових навантажень. Результати підтвердили стабільність, функціональність і відповідність пристрою заявленим технічним характеристикам.

Вдосконалення пристрою MBV-4-2

У поточній реалізації передача даних здійснюється через інтерфейс UART (Modbus RTU) [6], що вимагає прокладання дротових ліній зв'язку, іноді на значні відстані. Це створює певні труднощі при експлуатації в складних або розгалужених промислових об'єктах, де фізичне з'єднання може бути утрудненим або дорогим.

Для вирішення цієї задачі пропонується використовувати радіо модулі, наприклад E220-900T22D [8], які працюють у діапазоні 900 МГц і можуть бути легко інтегровані з UART-виходом приладу. Такі модулі забезпечують надійний бездротовий канал зв'язку з великою дальністю передачі (до кількох кілометрів у відкритому просторі) та високою перешкодостійкістю. Інтеграція модулів, подібних до E220-900, дасть можливість реалізувати:

- передачу даних між приладами без кабелів, що знижує витрати на монтаж та обслуговування;
- підключення до віддалених об'єктів без прокладання фізичних каналів (наприклад, у випадках, коли кабельна інфраструктура недоступна або застаріла);
- гнучке масштабування системи, коли до одного модулю можна додати нові пристрої, просто встановивши додатковий радіо модуль;
- підвищення мобільності системи – модуль можна переміщувати без перекомутації кабелів.

Такий напрямок розвитку особливо актуальний для об'єктів енергетики, водопостачання, аграрного сектору та інших галузей, де важливо мінімізувати втручання у фізичну інфраструктуру або забезпечити швидке розгортання системи.

Висновки і перспективи подальших розробок

Проведені дослідження показали, що пристрій MBV-4-2 є ефективним і надійним рішенням для застосування у промислових умовах, особливо в ситуаціях підвищеної аварійної небезпеки через перенапруги або нестабільне електропостачання. Пристрій успішно пройшов лабораторні випробування, продемонструвавши високу точність фільтрації сигналів, ефективність захисту від

аварійних впливів, стабільність обміну даними по протоколу Modbus RTU та збереження робочих станів після перезавантаження.

Основні здобутки роботи:

- створення пристрою з інтегрованим захистом від перенапруги;
- забезпечення гнучких налаштувань та сумісності з поширеними промисловими протоколами;
- реалізація функцій, що підвищують надійність (моніторинг зв'язку, дистанційне перезавантаження).

Перспективи подальшого розвитку пристрою включають впровадження бездротових технологій зв'язку (наприклад, на основі LoRa E220-900T22D або Zigbee), що дозволить підвищити мобільність системи, зменшити витрати на монтаж та експлуатацію, а також розширити функціонал за рахунок підтримки нових інтерфейсів і протоколів. Такі вдосконалення зроблять пристрій ще більш конкурентоспроможним на ринку промислової автоматизації.

Таким чином, розробка MBV-4-2 відповідає актуальним потребам промислової автоматизації та демонструє високий рівень надійності завдяки впровадженню апаратного захисту від перенапруги, розширеним комунікаційним можливостям і простоті інтеграції. Подальший розвиток у напрямку бездротової передачі даних відкриває нові горизонти для використання цього пристрою у різних галузях промисловості.

Література

1. Petruzella F.D. Programmable Controllers: Theory and Implementation. – Industrial Text & Video Company, 2005. – 1035 с. – ISBN 0-944107-32-X.
2. Wet vs. Dry Contacts: Knowing the Difference [Електронний ресурс] // control.com. – Режим доступу: <https://control.com/>. – Дата звернення: 08.05.2025.
3. Modbus RTU: A Comprehensive Guide [Електронний ресурс] // Wevolver. – Режим доступу: <https://www.wevolver.com/>. – Дата звернення: 08.05.2025.
4. VRC-R2 – модуль вводу-виводу [Електронний ресурс] // VKmodule. – Режим доступу: <https://vkmodule.com.ua/>. – Дата звернення: 08.05.2025.
5. MK110-4DN.4R – модуль вводу-виводу [Електронний ресурс] // Aqteck.ua. – Режим доступу: <https://aqteck.ua/>. – Дата звернення: 08.05.2025.
6. Dawoud D.S., Dawoud P. Serial Communication Protocols and Standards: RS232/485, UART/USART, SPI, USB, INSTEON, Wi-Fi and WiMAX. – River Publishers, 2020. – 44 с. – ISBN 978-87-7022-154-2.
7. What is Serial Wire Debug? [Електронний ресурс] // EmbeddedHow. – Режим доступу: <https://www.embeddedhow.com/>. – Дата звернення: 08.05.2025.
8. EBYTE E220-900T22D LoRa Wireless Transceiver [Електронний ресурс] // Manuals+. – Режим доступу: <https://manuals.plus/>. – Дата звернення: 08.05.2025.

References

1. Petruzella F.D. Programmable Controllers: Theory and Implementation. – Industrial Text & Video Company, 2005. – 1035 p. – ISBN 0-944107-32-X.
2. Wet vs. Dry Contacts: Knowing the Difference [Electronic resource] // control.com. – Access mode: <https://control.com/>. – Access date: 08.05.2025.
3. Modbus RTU: A Comprehensive Guide [Electronic resource] // Wevolver. – Access mode: <https://www.wevolver.com/>. – Access date: 08.05.2025.
4. VRC-R2 – input-output module [Electronic resource] // VKmodule. – Access mode: <https://vkmodule.com.ua/>. – Access date: 08.05.2025.
5. MK110-4DN.4R – input-output module [Electronic resource] // Aqteck.ua. – Access mode: <https://aqteck.ua/>. – Access date: 08.05.2025.
6. Dawoud D.S., Dawoud P. Serial Communication Protocols and Standards: RS232/485, UART/USART, SPI, USB, INSTEON, Wi-Fi and WiMAX. – River Publishers, 2020. – 44 p. – ISBN 978-87-7022-154-2.
7. What is Serial Wire Debug? [Electronic resource] // EmbeddedHow. – Access mode: <https://www.embeddedhow.com/>. – Access date: 08.05.2025.
8. EBYTE E220-900T22D LoRa Wireless Transceiver [Electronic resource] // Manuals+. – Access mode: <https://manuals.plus/>. – Access date: 08.05.2025.