

УДК 621.3.049.77

Кровиков Михаил Михайлович, магистрант, 2 курс направления «Конструирование и технология электронных средств», Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград

Бритков Олег Михайлович, кандидат технических наук, доцент института нано- и микросистемной техники, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград

РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСНОГО МОДУЛЯ УДАЛЕННОГО ВВОДА-ВЫВОДА С ПРОТОКОЛОМ MODBUS TCP/IP НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА МК32

Аннотация

В статье рассмотрена разработка интерфейсного модуля удалённого ввода-вывода, предназначенного для построения распределённых систем управления технологическими процессами. Проведён анализ существующих модулей расширения зарубежных и российских производителей, выявлены их недостатки – зависимость от импортной компонентной базы и высокая стоимость. Предложено конструктивное решение на базе отечественного микроконтроллера МК32 и протокола Modbus TCP/IP. Разработаны электрическая принципиальная схема, топология печатной платы и корпус модуля с креплением на DIN-рейку и оригинальной системой ножевых контактов. Выполнены расчёты надёжности, собственной резонансной частоты корпуса и теплового режима. Разработанный модуль позволяет подключать до 63 слотов ввода-вывода, сохраняя существующую кабельную архитектуру и обеспечивая импортозамещение в промышленной автоматике.

Abstract

The article discusses the development of a remote I/O interface module for distributed process control systems. An analysis of existing expansion modules from foreign and Russian manufacturers is carried out, their drawbacks – dependence on imported components and high cost – are identified. A structural solution based on the domestic MIK32 microcontroller and the Modbus TCP/IP protocol is proposed. The electrical schematic, PCB layout, and enclosure with DIN-rail mounting and an original blade contact system are developed. Reliability calculations, natural resonant frequency of the enclosure, and thermal analysis are performed. The developed module allows connection of up to 63 I/O slots while preserving the existing cable architecture and provides import substitution in industrial automation.

Ключевые слова: интерфейсный модуль, удалённый ввод-вывод, Modbus TCP/IP, промышленная автоматика, MIK32, модуль расширения.

Keywords: interface module, remote I/O, Modbus TCP/IP, industrial automation, MIK32, expansion module.

ВВЕДЕНИЕ

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) требуют подключения большого количества исполнительных устройств – датчиков, клапанов, частотных преобразователей, двигателей [3]. Программируемые логические контроллеры (ПЛК) физически не могут обеспечить сотни дискретных и аналоговых входов-выходов напрямую. Решением является применение распределённых систем ввода-вывода, где интерфейсный модуль расширения связывает ПЛК с удалёнными блоками через промышленную сеть [1].

На российском рынке автоматики сложилась парадоксальная ситуация: при наличии отечественных ПЛК и программного обеспечения, модули расширения, как правило, полностью построены на импортной компонентной базе (микроконтроллеры Atmel, STMicroelectronics, Ethernet-чипы). Их стоимость достигает 25–50 тыс. рублей при сроках поставки 12–14 недель. Отсутствуют решения на базе российской микроэлектроники, в частности на микроконтроллере МК32 производства АО «Микрон» [2].

В данной работе ставится задача разработки интерфейсного модуля удалённого ввода-вывода с протоколом Modbus TCP/IP, на отечественных компонентах. Модуль должен обеспечивать подключение до 63 слотов аналоговых и дискретных модулей и иметь характеристики, сопоставимые с лучшими зарубежными аналогами.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДУЛЕЙ РАСШИРЕНИЯ

Базой для сравнения выбраны три типовых представителя: израильский Unitronics URB-TCP (удалённый, поддержка до 63 слотов), австрийский Bachmann DIO280 (80 дискретных каналов на одном модуле, не удалённый) и российский ОВЕН ПРМ (подключение до двух модулей расширения). Анализ проводился по критериям: страна разработки, компонентная база, стоимость, доступность, конфигурируемость. Результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнение существующих модулей расширения

Модель	UBB-TCP	Bachmann DIO280	ПРМ ОВЕН
Страна разработчик	Израиль	Австрия	Россия
Компонентная база	Импортная	Импортная	Импортная
Стоимость, рублей	22000-30000	50000	7000-12000
Наличие, доставка	Редкое наличие, длительное время доставки	Редкое наличие, длительное время доставки	Высокая доступность, быстрая доставка
Конфигурация	Возможность добавления до 63 слотов, удаленный	Определенный тип входов/выходов, не удаленный	Определенный тип входов/выходов, удаленный
Возможности микроконтроллера	Есть необходимые интерфейсы связи, количество памяти, программные возможности	Есть необходимые интерфейсы связи, количество памяти, программные возможности	Есть необходимые интерфейсы связи, количество памяти, программные возможности
Габаритные размеры, длина×высота×ширина, мм	54×99×70	110×100×70	88×90×58

Основной недостаток всех трёх устройств – полная зависимость от импортных микроконтроллеров и периферии. ОВЕН формально является российским производителем, но его модули ПРМ используют чипы STM32. Кроме того, размеры корпусов велики, а возможность удалённого подключения слотов реализована только у Unitronics.

РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСНОГО МОДУЛЯ

Для устранения выявленных недостатков предложено собственное решение на базе микроконтроллера МК32 (рисунок 1 – структурная схема). Микроконтроллер имеет ядро RISC-V, тактовую частоту 32 МГц, объём FLASH 256 Кбайт, ОЗУ 16 Кбайт, интерфейсы SPI, I2C, UART, 12-битные АЦП и ЦАП. Корпус QFN64, диапазон температур $-40...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

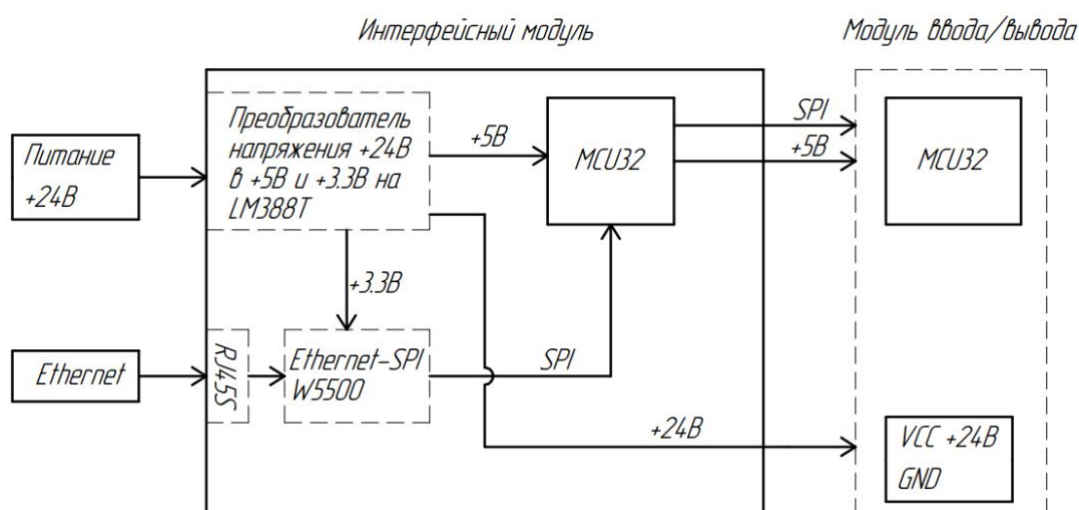


Рисунок 1 – Структурная схема модуля [1].

В качестве Ethernet-модуля выбран W5500 mini со встроенным стекком TCP/IP и интерфейсом SPI. Подключение к модулям ввода-вывода организовано по шине SPI с использованием цифровых буферов SN74LVC1G126 и триггеров Шмитта SN74LVC1G14 для защиты от помех. Питание +24 В преобразуется в +5 В и +3,3 В с помощью линейных стабилизаторов HT7533 [4].

Особое внимание уделено конструкции соединения модулей. Разработана оригинальная система ножевых контактов (по аналогии с Unitronics, но полностью оригинальная геометрия). Контакты выполнены из меди (ГОСТ 859-2014) с пластиковым каркасом из поликарбоната ABS UL94-V0. Такая конструкция позволяет «вертикально» наращивать модули ввода-вывода без кабелей – достаточно задвинуть один модуль в другой (рисунок 2).

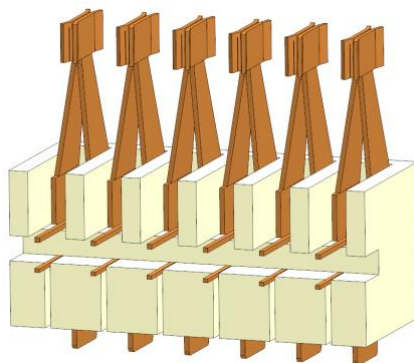


Рисунок 2 – Ножевые контакты для коммутации модулей [1]

Разработана печатная плата размерами 90×65 мм, двухслойная, материал FR4 TG135 [5]. Топология выполнена в САПР Altium Designer. На нижней стороне размещены модуль W5500, стабилизаторы и светодиодная индикация, на верхней – ножевые контакты. Модель платы показана на рисунке 3.

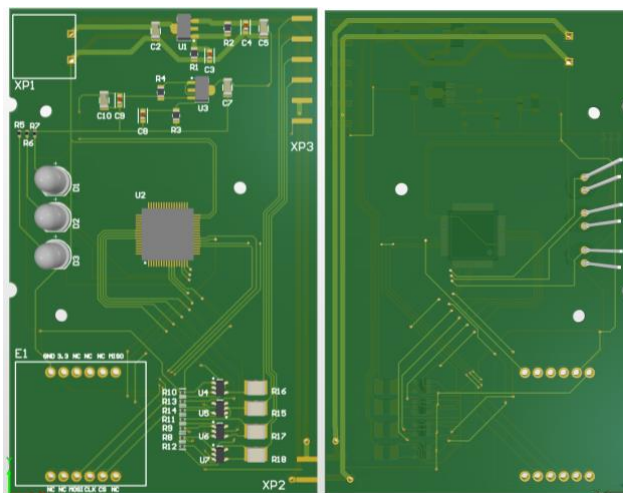


Рисунок 3 – Плата модуля расширения [1]

Корпус модуля (рисунок 4) состоит из основания и крышки, материал – поликарбонат ABS UL94-V0 (самозатухающий). Предусмотрено крепление на DIN-рейку. Габаритные размеры сборки: 79×110×32,8 мм, масса 0,221 кг.

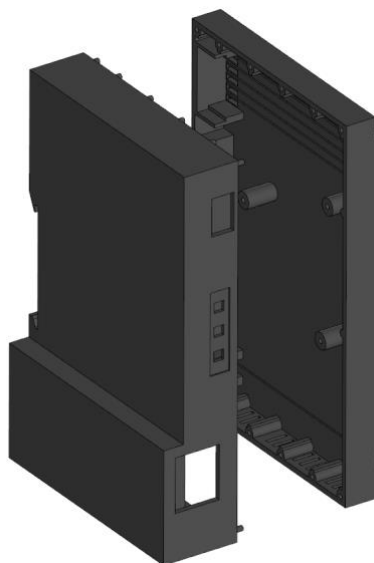


Рисунок 4 – Конструкция корпуса [1]

РАСЧЁТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Надёжность. Выполнен расчёт интенсивности отказов λ для всех компонентов модуля с учётом поправочных коэффициентов (механические воздействия, температура, высота). Суммарная интенсивность отказов $8,069 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Среднее время безотказной работы $\approx 123\,931$ час (более 14 лет). Вероятность безотказной работы за 10 000 часов (требование технического задания) составляет 0,922 (92,2 %), что удовлетворяет требованию 90 %.

Собственная резонансная частота корпуса. Моделирование в САПР Pro/Engineer с учётом закрепления на DIN-рейке дало значение первой собственной частоты изгибных колебаний 215 Гц. Это выше требуемых 200 Гц для транспортировки и 120 Гц для стационарной эксплуатации согласно ГОСТ 16019-78.

Тепловой режим. В САПР SolidWorks Flow Simulation проведён тепловой анализ платы. Наибольший нагрев наблюдается на стабилизаторе 24 В → 5 В – до 65 °С. Остальные компоненты не превышают 50 °С. Все элементы работают в допустимом температурном диапазоне.

ПРЕИМУЩЕСТВА РАЗРАБОТАННОГО РЕШЕНИЯ

Разработанный интерфейсный модуль обладает следующими преимуществами:

- Отечественная компонентная база (микроконтроллер МК32 российского производства);
- Поддержка протокола Modbus TCP/IP – самого распространённого в промышленной автоматике;
- Возможность подключения до 63 слотов аналоговых/дискретных модулей;
- Оригинальная система ножевых контактов для вертикального наращивания без кабелей;
- Габариты и масса меньше, чем у большинства аналогов (сопоставимы с Unitronics);
- Расчётная надёжность более 14 лет непрерывной работы;
- Температурный диапазон –40...+85 °С позволяет эксплуатировать модуль в неотапливаемых помещениях.

Ориентировочная себестоимость производства модуля – не более 25 тыс. рублей, что при серийном выпуске может быть снижено до 15–18 тыс. Итоговый вид разработки показан на рисунке 5.

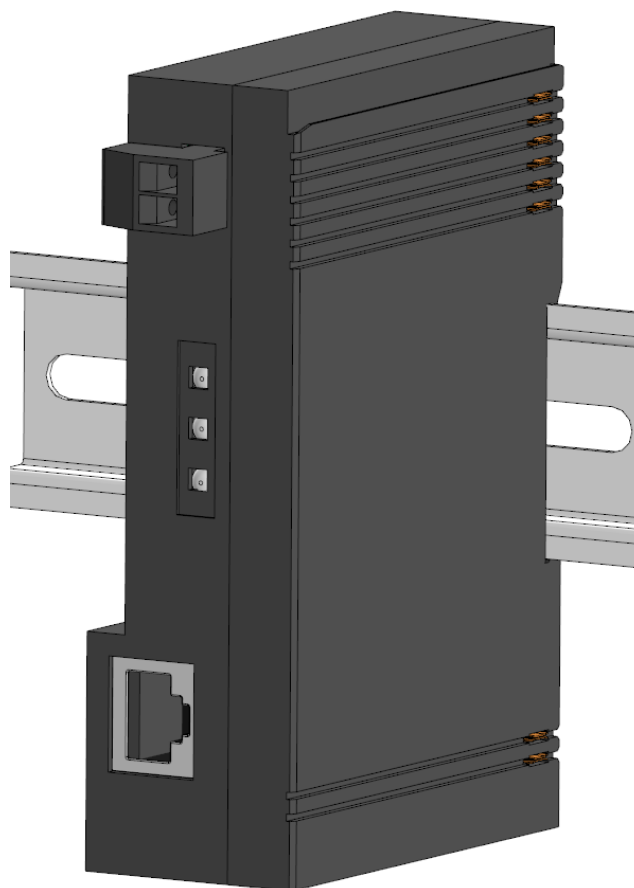


Рисунок 5 – Итоговый вид конструкции модуля расширения [1]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы выполнена разработка интерфейсного модуля удалённого ввода-вывода для промышленных сетей Modbus TCP/IP на базе российского микроконтроллера МК32. Проведён анализ существующих решений, выявлена их зависимость от импортных компонентов. Предложена электрическая принципиальная схема, разработана двухслойная печатная плата, спроектирован корпус с креплением на DIN-рейку и оригинальной системой ножевых контактов. Расчёты подтвердили надёжность (среднее время безотказной работы ~14 лет), вибропрочность (собственная частота 215 Гц) и допустимый тепловой режим. Разработанный модуль позволяет импортозаместить критически важные компоненты систем автоматизации,

снизить зависимость от иностранных поставщиков и обеспечить построение распределённых АСУ ТП на отечественной элементной базе.

Литературы:

1. Кровиков М. М. Разработка интерфейсного модуля удалённого ввода-вывода по протоколу Modbus TCP/IP на базе МІК32 : выпускная квалификационная работа. – Москва : НИУ МИЭТ, 2026. – 103 с.
2. АО «Микрон». RISC-V микроконтроллер МІК32 АМУР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mikron.ru/products/iot/mk32-amur/> (дата обращения: 20.05.2026).
3. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М. : Горячая линия-Телеком, 2014. – 606 с.
4. Хоровиц П., Уилл У. Искусство схемотехники. – М. : БИНОМ, 2014. – 706 с.
5. Rezonit. Технология производства печатных плат [Электронный ресурс]. – URL: <https://rezonit.ru> (дата обращения: 18.05.2026).

Literature

1. Krovikov M. M. Development of a Remote I/O Interface Module Based on the Modbus TCP/IP Protocol Using the MIK32 Microcontroller : Final Qualification Work. – Moscow : National Research University of Electronic Technology (MIET), 2026. – 103 p.
2. JSC Mikron. RISC-V Microcontroller MIK32 AMUR [Electronic resource]. – Access mode: <https://mikron.ru/products/iot/mk32-amur/> (accessed: 20.05.2026).

3. Denisenko V. V. Computer Control of Technological Processes, Experiments, and Equipment. – Moscow : Hot Line – Telecom, 2014. – 606 p.
4. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. – Moscow : BINOM, 2014. – 706 p.
5. Rezonit. Printed Circuit Board Manufacturing Technology [Electronic resource]. – URL: <https://rezonit.ru> (accessed: 18.05.2026).