

УДК 004**РАЗРАБОТКА ВНУТРЕННЕГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДУЛЯ СОПРЯЖЕНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ**

Чечетка Е.А., студентка гр. 273, 2 курс

Научный руководитель: Андрейченко Д.К., профессор, д.ф.-м.н.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Г. Саратов

Введение

Коррозия металлических конструкций является одной из наиболее важных проблем современной промышленной инфраструктуры, особенно для подземных хранилищ газа, эксплуатируемых в непосредственном контакте с агрессивной грунтовой средой. Электрохимические коррозионные процессы, протекающие на поверхности металла, приводят к постепенному разрушению конструкций, снижению их несущей способности и эксплуатационной надежности и, в конечном счете, к авариям, экологическим катастрофам и значительным экономическим потерям.

Нефтегазовая отрасль, располагающая разветвленной сетью трубопроводов суммарной протяженностью десятки тысяч километров, несет особенно ощутимый ущерб от коррозионных повреждений. Аварийные разрывы трубопроводов влекут за собой не только прямые потери углеводородного сырья и затраты на восстановительный ремонт, но и долгосрочное загрязнение почвы и грунтовых вод, а также угрозу жизни и здоровью людей. В этой связи обеспечение надежной противокоррозионной защиты подземных объектов инфраструктуры приобретает стратегическое значение.

Наиболее эффективным методом защиты от электрохимической коррозии является катодная защита. Ее принцип основан на поляризации защищаемой конструкции до потенциала, при котором анодное растворение металла прекращается. Однако одного лишь применения катодной защиты недостаточно – для обеспечения ее стабильной работы необходим постоянный контроль ключевых параметров: защитного потенциала, выходного тока и напряжения, температуры среды и скорости коррозии. Своевременное отслеживание этих показателей позволяет оперативно выявлять отклонения от нормы, предупреждать аварийные ситуации и не допускать того, чтобы постепенно

нарастающая угроза осталась незамеченной до момента необратимого разрушения конструкции.

Вместе с тем, несмотря на очевидную востребованность подобных решений, на российском рынке на сегодняшний день фактически отсутствуют комплексные системы, способные обеспечить централизованный мониторинг большого числа параметров катодной защиты в рамках единой программно-аппаратной платформы отечественного производства. Существующие зарубежные аналоги, помимо высокой стоимости, не отвечают современным требованиям технологической независимости российской промышленности.

В этих условиях разработка отечественного модуля сопряжения системы мониторинга катодной защиты (МССМ), обеспечивающего одновременный опрос до 32 контрольно-измерительных пунктов (КИП), централизованный сбор данных и передачу информации в систему телемеханики, представляет собой актуальную и практически значимую задачу.

Целью настоящей работы является разработка внутреннего программного обеспечения данного модуля, включающего драйвер многоканального интерфейса, реализацию протокола промышленной связи и пользовательский интерфейс для управления системой.

Описание модуля сопряжения системы мониторинга

МССМ представляет собой отечественное программно-аппаратное решение, разработанное для сбора и анализа данных о коррозионных процессах, а также передачи полученных данных в систему телемеханики по интерфейсу RS-485.

Модуль предназначен для применения в следующих областях:

- магистральные трубопроводы для транспортировки природного газа и нефтепродуктов;
- подземные хранилища газа;
- другие критически важные объекты инфраструктуры нефтегазовой отрасли.

Ключевым преимуществом МССМ является комплексный подход к диагностике коррозионных процессов, позволяющий одновременно отслеживать до 32 контрольно-измерительных пунктов в рамках единого модуля, что существенно снижает эксплуатационные затраты и повышает надежность системы в целом.

Архитектура модуля

В основе модуля находится 32-битный микроконтроллер GD32F407VET6 с ядром ARM Cortex-M4, выступающий центральным управляющим устройством. Он обеспечивает сбор, обработку и передачу данных, а

также координацию взаимодействия между всеми компонентами системы посредством интерфейсов UART, SPI и I2C.

Для расширения числа доступных UART-портов используется многоканальный интерфейсный контроллер CH9434M, обеспечивающий четыре дополнительных канала связи. Взаимодействие микроконтроллера с CH9434M осуществляется по интерфейсу SPI, что минимизирует задержки при обмене данными. Преобразование сигналов UART в сигналы стандарта RS-485 выполняется драйверами NSI3830SE, обеспечивающими надежную передачу данных на значительные расстояния в условиях промышленных электромагнитных помех.

В состав модуля также входят: FLASH-память BL24C08 для хранения конфигурационных параметров, графический OLED-дисплей, а также USB-интерфейс для локальной настройки и обновления программного обеспечения.

Для организации связи между модулем и подключенными устройствами выбран протокол RS-485, обеспечивающий дальность передачи до 1200 метров, высокую помехоустойчивость за счет дифференциального способа передачи сигнала, а также возможность подключения нескольких устройств к одной линии связи в полудуплексном режиме. Стандарт RS-485 гарантирует совместимость с промышленным оборудованием широкого круга производителей.

На прикладном уровне используется протокол Modbus RTU, реализующий архитектуру клиент-сервер (Master-Slave): микроконтроллер MCCM выполняет функции мастера, периодически опрашивая подключенные КИП (ведомые устройства) и выполняя чтение или запись регистров. Сообщение Modbus RTU включает адрес ведомого устройства (SlaveID), код функции, сами данные и контрольную сумму CRC.

Архитектура программного обеспечения

Внутреннее программное обеспечение MCCM состоит из нескольких функциональных блоков. Рассмотрим каждый из них.

Первый блок – это разработанный драйвер, предназначенный для организации работы с многоканальным интерфейсным контроллером CH9434M через шину SPI. Драйвер реализует полный набор функций для управления UART-портами микросхемы, включая инициализацию, настройку параметров передачи и управление потоком данных.

Базовыми операциями являются функции чтения и записи регистров микросхемы. Функция чтения активирует линию выбора (CS), отправляет адрес регистра по интерфейсу SPI с соблюдением временных задержек, указанных в документации, считывает ответный байт и деактивирует CS. Функция записи формирует адрес регистра с установленным битом записи, после чего последовательно передает адрес и значение.

Для управления передачей и приемом данных драйвер реализует как синхронные (блокирующие), так и асинхронные (неблокирующие) режимы. Синхронная передача поочередно записывает байты в специально отведенный регистр и дожидается завершения отправки каждого байта, опрашивая регистр состояния линии. Асинхронная функция инициализирует передачу, сохраняет буфер данных и регистрирует функцию обратного вызова, которая будет вызвана по завершении отправки – без блокировки основного потока выполнения.

Функция инициализации одного из UART-портов включает: настройку SPI-соединения, аппаратный сброс чипа, конфигурацию режима RS-485, задание параметров передачи (скорость, формат кадра, контроль четности). Скорость передачи задается через делитель, вычисляемый по формуле:

$$\text{Делитель} = \frac{\text{Частота тактирования}}{8 \times \text{baud rate}}$$

где тактовая частота чипа составляет 32 МГц.

Второй блок – расширение карты регистров, необходимое для поддержки конфигурационных параметров модуля и подключенных устройств.

Для каждого из 32 устройств выделяется пара регистров в диапазоне 8000–8063 – такое расположение исключает пересечение с основной картой регистров. Первый регистр пары кодирует в 16-битном значении три поля: адрес устройства в сети Modbus, номер интерфейса и текущий статус устройства. Использование битового представления позволяет за одно обращение по протоколу Modbus получить полную информацию о конфигурации и состоянии устройства, что снижает нагрузку на канал связи. Второй регистр пары хранит период опроса устройства в секундах.

После диапазона регистров устройств (адреса 8064–8066) размещены глобальные регистры модуля: адрес МССМ на шине Modbus, время работы дисплея и версия прошивки (только для чтения). При записи адреса МССМ выполняется перезапуск Modbus-slave для применения нового адреса без полной перезагрузки устройства. Все изменения конфигурационных параметров сохраняются в энергонезависимой памяти EEPROM, что обеспечивает их восстановление после перезапуска модуля.

Третий блок – пользовательский интерфейс модуля, реализованный на графическом OLED-дисплее под управлением контроллера SSD1322. Для работы с дисплеем используется кроссплатформенная библиотека u8g2 в режиме полноэкранный буфера, обеспечивающем формирование полного изображения в памяти перед выводом. Управление интерфейсом осуществляется четырьмя кнопками: вверх, вниз, ввод и отмена.

Интерфейс включает четыре основных экрана:

- экран заставки, который отображается при включении устройства и содержит наименование системы и версию прошивки;

- экран статуса, отображающий 32 пиктограммы – по одной на каждое подключенное устройство, – кодирующие текущее состояние: устройство отключено, статус неизвестен, нет ответа, ответ с ошибкой или ответ без ошибок;
- экран настроек устройства, который позволяет просматривать и редактировать номер интерфейса, адрес устройства, период опроса, а также переходить в подменю параметров, отображающее технические характеристики КИПа в реальном времени;
- экран глобальных настроек, предназначенный для конфигурации адреса МССМ, времени работы дисплея и выполнения сброса устройств.

Приложение для мониторинга параметров

Приложение разработано в среде Qt Creator с использованием языка C++. Для взаимодействия с МССМ по протоколу Modbus RTU через СОМ-порт применяется модуль Qt SerialPort. Графический интерфейс построен на основе Qt Widgets.

На начальном экране пользователь выбирает последовательный порт, задает адрес устройства и скорость обмена. Поскольку одновременное отображение всех параметров 32 устройств является избыточным и затрудняет восприятие, в приложении реализованы диалоговые окна настройки: пользователь задает количество устройств и их номера, после чего автоматически формируется список Modbus-регистров для опроса с корректным смещением адресов.

Для каждого устройства автоматически создается набор визуализаторов двух типов: для числовых параметров с масштабированием и единицами измерения, а также для параметров перечислимого типа (режимы работы, состояния, дискретные сигналы). Конфигурационный регистр, полученный при расширении карты, логически разбивается на отдельные поля, каждое из которых отображается как самостоятельный элемент интерфейса.

Сформированный список параметров кэшируется и повторно используется при последующих сеансах опроса, что исключает повторный ввод данных и снижает нагрузку на интерфейс. Приложение отображает сначала настройки самого МССМ (адрес, время работы дисплея, версия ПО), затем конфигурационные и расширенные параметры выбранных устройств, после чего – их текущие измеряемые характеристики.

Порт:	tttyUSB0 - FT232R USB UART
Адрес:	7
MSSM(RTU/dev/ttyUSB0:7)	
Обмен	☒ x
Калибровка	Начать
Версия ПО	v0.1
Адрес MSSM	7
Время работы дисплея	60 сек
Адрес устройства-1	8
Номер интерфейса-1	4
Состояние-1	OK
Период опроса-1	120 сек
Адрес устройства-3	8
Номер интерфейса-3	4
Состояние-3	НЕИЗВЕСТНО
Период опроса-3	30 сек
Температура внешняя-1	100 °C
ВДТ-1	46 °C
Ивых-1	0.01 A
Увых-1	0.08 B
Усп-1	-0.08 B
Упп-1	0.03 B
РУ-1	стабилизация напряжения

Рисунок 1 – Вывод параметров

Тестирование и результаты

Тестирование программного обеспечения проводилось в условиях опытно-промышленной эксплуатации с подключением реальных КИПов. Первым этапом верификации была проверка соответствия параметров, считанных приложением, данным, отображаемым непосредственно на дисплее MSSM.

В ходе тестирования было установлено, что значения параметров устройства (напряжение сети, выходной ток, выходное напряжение, суммарный и поляризационный потенциалы, режим управления), отображаемые в приложении, полностью совпадают с данными на экране соответствующего КИПа и на дисплее модуля MSSM. Это подтверждает корректность реализации обмена по протоколу Modbus RTU, достоверность считываемых данных и правильность интерпретации форматов регистров.

	Температура внешняя-1	100 °C
	ВДТ-1	47 °C
	Ивых-1	0.01 A
	Увых-1	0.09 B
	Усп-1	-0.08 B
	Упп-1	0.04 B
	РУ-1	стабилизация напряжения

Рисунок 2 – Сравнение значений на модуле и в приложении

Второй этап тестирования был направлен на проверку корректности записи параметров как с Qt-приложения в MSSM, так и непосредственно через КИП. В качестве одного из тестовых параметров использовалось значение «Время работы дисплея». Исходное значение параметра – 200 секунд – было изменено на 60 секунд через приложение. Проверка на дисплее модуля подтвердила применение нового значения. Аналогичная проверка была проведена и для параметров отдельных подключенных устройств.

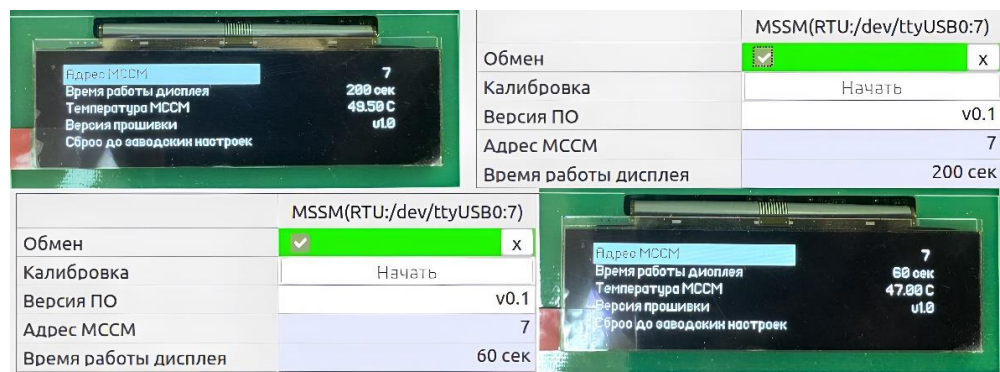


Рисунок 3 – Изменение параметра «Время работы дисплея»

Изменения корректно применяются в обоих направлениях и для всех параметров, для которых разрешена операция записи. Данные сохраняются в энергонезависимой памяти модуля и восстанавливаются после перезапуска.

В рамках опытно-промышленной эксплуатации была проверена работа системы при одновременном опросе нескольких устройств. Экран статуса дисплея MSSM отображал пиктограммы состояния всех устройств, при этом каждое из устройств корректно идентифицировалось по номеру и адресу в сети Modbus.

Разработанное приложение обеспечивает корректный вывод параметров каждого из выбранных устройств с автоматическим смещением адресов регистров.



Рисунок 4 – Экран статуса при одновременном опросе нескольких устройств

По результатам тестирования разработанное программное обеспечение признано работоспособным и пригодным для практического использования в системе мониторинга катодной защиты.

Заключение

В настоящей работе представлен полный цикл разработки программного обеспечения для модуля сопряжения системы мониторинга катодной защиты подземных стальных сооружений.

Проведенное тестирование в условиях опытно-промышленной эксплуатации подтвердило работоспособность и практическую пригодность реализованного решения.

Разработанное программное обеспечение может применяться на объектах нефтегазовой инфраструктуры: магистральных трубопроводах, подземных хранилищах газа и других критически важных объектах, где требуется непрерывный контроль параметров катодной защиты.

Список литературы:

1. Бояринов, Е. Анализ протокола RS-485 [Текст] / Е. Бояринов, И. А. Щинников // Сборник трудов международной научно-практической конференции. — Тюмень : ГАУ Северного Зауралья, 2023. — С. 229–235.
2. Катукия, Г. Т. Анализ и сравнение интерфейсов передачи данных на микроконтроллерах [Текст] / Г. Т. Катукия, А. В. Дорофеев, Д. Е. Линтварев // Политехнический молодежный журнал. — 2020. — № 7. — С. 48.
3. Лазарева, Н. Б. Разработка автоматизированной системы управления на Modbus-протокол [Текст] / Н. Б. Лазарева, М. В. Еремеев // Инженерный вестник Дона. — 2024. — № 9. — С. 1–13.
4. Городничев, М. Г. Разработка кроссплатформенного программного обеспечения [Текст] / М. Г. Городничев, Т. Д. Фатхулин, Х. А. Джабраилов. — Санкт-Петербург : Наукоемкие технологии, 2023.
5. Туляков, В. С. Элементы промышленной автоматики [Текст] / В. С. Туляков. — Владимир : ВлГУ, 2021.
6. Титаев, А. А. Промышленные сети [Текст] / А. А. Титаев. — Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2020.
7. Сальников, М. С. Введение в протокол MODBUS RTU: основные принципы и преимущества [Текст] / М. С. Сальников, А. А. Суханкин // Научное обозрение. — Пенза : Наука и Просвещение, 2023. — С. 74–76.
8. Gheorghit, V. Modbus RTU Protocol Timing Evaluation for Holding Register Read [Текст] / V. Gheorghit, I. Zagan, C. Gaitan // Processes (MDPI). — 2025.
9. Грузин, Н. А. Обзор и сравнение библиотек пользовательских интерфейсов: GTK QT WxWidgets [Текст] / Н. А. Грузин, А. А. Голубничий // E-Scio. — 2020. — № 2. — С. 2–9.
10. Самойлов, С. А. Программирование микроконтроллеров для беспроводных систем связи [Текст] / С. А. Самойлов, В. С. Самойлов. — Владимир : ВлГУ, 2023.