

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Энергетический факультет
Кафедра «Автоматизированный электропривод»
Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

**Заведующий кафедрой
автоматизированного электропривода,
д.т.н., профессор**

_____ / М.А. Григорьев /
« _____ » _____ 2020 г.

Использование технологий промышленного интернета вещей (IIoT)
в системах контроля и диагностики автоматизированного электропривода

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПО ПРОГРАММЕ БАКАЛАВРИАТА
«ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ»
ЮУрГУ–13.03.02.2020.216 ВКР**

Руководитель, должность
_____ / А.С. Нестеров /
« _____ » _____ 2020 г.

**Автор работы,
бакалавр группы П-477**
_____ / М.Ю. Баранников /
« _____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер, должность
_____ / Т.А. Функ /
« _____ » _____ 2020 г.

Челябинск 2020

АННОТАЦИЯ

Баранников М.Ю. Использование технологий
промышленного интернета вещей (IIoT) в системах контроля и
диагностики автоматизированного электропривода. –
Челябинск: ЮУрГУ, Э; 2020, 79 с., 24 ил., 8 табл.,
библиографический список – 23 наим., 1 лист чертежа ф. А3

В выпускной квалификационной работе спроектировано устройство и разработана программная среда, которая позволяет производить контроль и диагностику электропривода при помощи технологий промышленного интернета вещей.

В процессе разработки электронного устройства был проведён выбор элементной базы, созданы функциональная и принципиальные схемы, спроектированы печатная плата и корпус устройства.

Благодаря разработанной системе, эксплуатация автоматизированного электропривода станет экономичнее и безопаснее.

| | | | | | | | | |
|-----------|------|-----------------|---------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|--------|
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | |
| Разраб. | | Баранников М.Ю. | | | <i>Использование технологий промышленного интернета вещей (IIoT) в системах контроля и диагностики автоматизированного электропривода.</i> | Лит. | Лист | Листов |
| Провер. | | Нестеров А.С. | | | | | 4 | |
| Реценз | | | | | | <i>ЮУрГУ Кафедра «АЭП»</i> | | |
| Н. Контр. | | Функ Т.А. | | | | | | |
| Утверд. | | Григорьев М.А. | | | | | | |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.1 Обзор среды разработки Node-RED | 48 |
| 4.2.2 Формирование требований к программе диагностики | 51 |
| 4.2.3 Результаты разработки | 53 |
| 4.3 Обеспечение информационной безопасности | 54 |
| 4.4 Программно-аппаратные характеристики разработанного устройства | 57 |
| 4.5 Интеграция со SCADA-системами | 57 |
| 5 ДИАГНОСТИКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА..... | 59 |
| 5.1 Виды неисправностей электропривода и критерии для их диагностики..... | 59 |
| 5.2 Существующие методы диагностики асинхронного двигателя | 60 |
| 5.3 Применение метода диагностики по результатам измерения параметров рабочего режима | 62 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 68 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 70 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | 73 |

Важным этапом в модернизации электропривода является его интегрирование с технологией промышленного интернета вещей. Сопряжение двух данных областей позволит использовать электропривод более эффективно и безопасно [3]. В качестве примера можно рассмотреть ситуацию, при которой автоматическая система контроля и диагностики собирает и анализирует данные с электроприводов, чтобы вовремя узнавать о поломках. Вследствие этого можно сэкономить на ремонте, так как замена полностью сломанной детали стоит намного дороже, чем вовремя сделанный ремонт. Кроме этого, поломка или вывод из строя двигателя может привести к авариям и поставить под угрозу здоровье и жизнь людей. Анализ данных о состоянии двигателей позволяет вовремя реагировать и помогает предотвратить ситуации, создающие риск жизни для рабочих.

Также индустриальный интернет вещей кардинально изменяет всю экономическую модель взаимодействия «поставщик – потребитель». Это позволяет:

- автоматизировать процесс мониторинга и управления жизненным циклом оборудования;
- организовать эффективные самооптимизирующиеся цепочки от предприятий – поставщиков до компаний – конечных потребителей;
- перейти к моделям «экономики совместного использования» и многое другое.

В наиболее продвинутых случаях индустриальный интернет вещей позволяет не только повысить качество технической поддержки оборудования с использованием развитых средств телеметрии, но и обеспечить переход к новой бизнес-модели его эксплуатации, когда оборудование оплачивается заказчиком по факту использования его функций.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 8 |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | |

Внедрение сетевого взаимодействия между машинами, оборудованием, зданиями и информационными системами, возможность осуществлять мониторинг и анализ окружающей среды, процесса производства и собственного состояния в режиме реального времени, передача функции управления и принятия решений интеллектуальным системам приводят к смене «парадигмы» технологического развития, называемой также «четвертой промышленной революцией».

Зарубежные эксперты признают интернет вещей технологией, которая вносит необратимую трансформацию в организацию современных производственных и бизнес-процессов и порождает новые бизнес-модели.

Кроме этого, технология интернета вещей в приводной технике позволит внедрить электропривода в общую систему умного города, идеи которого сейчас также активно развиваются.

В выпускной квалификационной работе ставится задача спроектировать и разработать устройство, а также создать программную среду, которая позволяет производить контроль и диагностику электропривода при помощи технологий промышленного интернета вещей. Благодаря разработанной системе, эксплуатация автоматизированного электропривода будет экономичнее и безопаснее.

В работе не ставится задача применить какой-либо конкретный метод диагностики электропривода, а создаётся среда для применения различных методов диагностики на разные виды электроприводов.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 9 |

1 ОПИСАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

1.1 Современная практика технического менеджмента

Невозможно эффективно управлять производственными процессами без знания актуальной информации о техническом состоянии и режиме работы оборудования. Существует два практических подхода к оценке технического состояния промышленного электропривода, которые иногда совмещаются либо применяются по отдельности: мониторинг и диагностика.

Мониторинг технического состояния предполагает непрерывное отслеживание ряда параметров привода (максимальные токи, температуры узлов, общего уровня вибрации и т.д.) и реагирование системы (или оператора) на выход этих параметров за допустимые пределы. Ответ на это может включать в себя остановку технологического процесса и проведение детальной диагностики проблемного оборудования.

Диагностика электропривода — это комплекс мероприятий, предполагающих углубленный анализ состояния оборудования, его составных частей и режимов их функционирования. Цель этого анализа — выявление дефектов и формирование предписаний по эксплуатации и обслуживанию оборудования.

В зависимости от степени участия экспертов в оценке технического состояния оборудования, различают экспертно-ориентированные и автоматизированные системы.

1) Экспертно-ориентированный мониторинг и диагностика:

На предприятии работает коллектив экспертов, оснащённый средствами съёма и технического анализа оборудования. С помощью приборов фиксируются значения, записывают и обрабатывают их. Далее эксперты анализируют полученные данные и пытаются оценить техническое состояние электропривода и определить дефекты конкретных узлов.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 10 |

Сенсоров и приложений АСУ ТП на данный момент существует очень много, но как взять из них данные – это одна из основных задач. Системы, которые были созданы 20, 30 или даже 40 лет назад, умеют делиться данными, но в очень тяжело потребляемом виде.

Изменение инфраструктуры АСУ ТП, включая датчики, для внедрения промышленного интернета вещей в производство влечет за собой высокие затраты, поэтому при разработке устройства диагностики, нужно учитывать все старые протоколы и интерфейсы для их дальнейшего преобразования в форматы интернета вещей.

Второй важный барьер связан с безопасностью. Рост IoT приводит к увеличению потенциальных кибератак. Высокое проникновение промышленного интернета вещей в критически важную инфраструктуру и производственный сектор привело к увеличению числа потенциальных кибератак [4]. Проблема настолько серьезна, что рассматривается на самом высоком уровне. В отчете Всемирного экономического форума говорится, что выработка единого подхода к решению проблемы безопасности – самый необходимый шаг для развития интернета вещей. Поэтому при разработке устройства диагностики необходимо его конструировать таким образом, чтобы оно никак не могло повлиять на производственный процесс даже в случае его взлома.

Третий проблемой является высокая стоимость модернизации. Уже существующие на рынке устройства диагностики и анализа имеют высокую цену. При наличии на производстве большого количества электроприводов установка устройств диагностики составит большую сумму и рентабельность такой модернизации будет под вопросом. Поэтому необходимо предложить рынку такое устройство и сервис, которое бы обеспечило стоимость его использования на порядок ниже капитальных вложений, на развёртывание и поддержку стационарных узкоспециализированных диагностических систем.

Учитывая все перечисленные проблемы, поставлена задача сконструировать устройство для контроля и диагностики автоматизированного электропривода со следующими аппаратными особенностями и качествами:

- Возможность интеграции с традиционными промышленными протоколами и интерфейсами;
- Обеспечение информационной безопасности данных;
- Возможность применять различные методы диагностики электроприводов;
- Низкая стоимость готового устройства.

1.4 Обзор существующих технических решений

Перед началом проектирования необходимо рассмотреть существующие аналоги.

На данный момент на рынке нет большого разнообразия приборов, способных осуществлять интеграцию электропривода с технологиями промышленного интернета вещей. Из самых близких по идее эксплуатации являются модульная система ioThinx 4500 (рисунок 1.1) от российской компании МОХА и шлюз UA-5231 (рисунок 1.2) от производителя ICP DAS из Тайваня.

Основные программно-аппаратные характеристики устройств ioThinx 4500 и UA-5231 предоставлены в таблице 1.1 и 1.2 соответственно.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 15 |

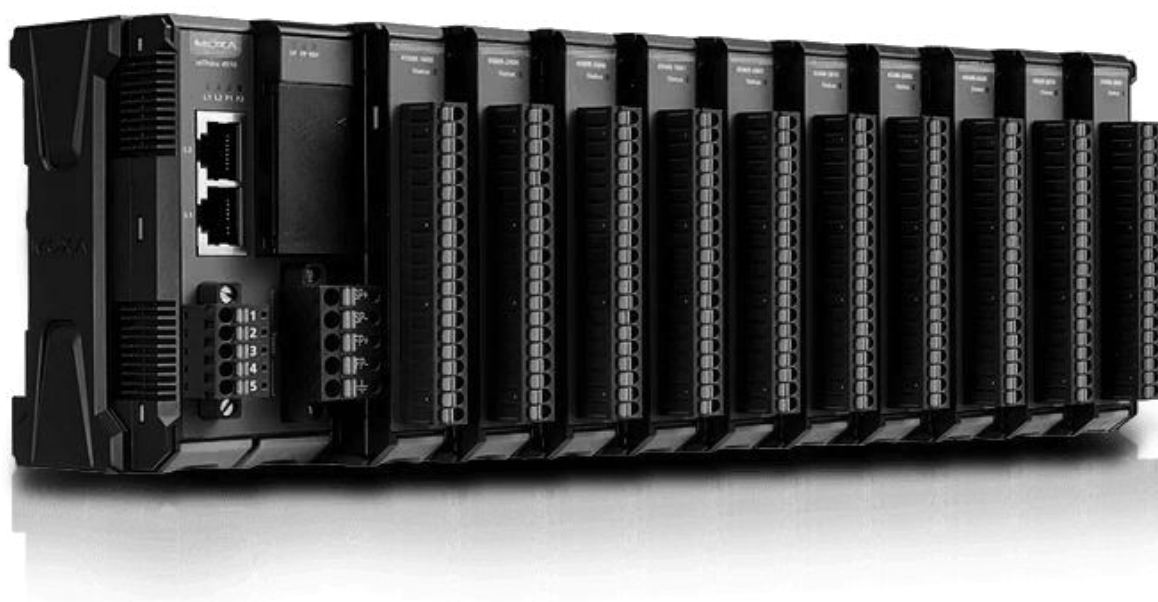


Рисунок 1.1 – Модульная система iоThinX 4500



Рисунок 1.2 – ПоТ шлюз UA-5231

Таблица 1.1 – Программно-аппаратные характеристики модуля ioThinx 4500

| Параметр | Значение |
|---------------------------------|--------------------------------------------|
| Реализация корпуса | Пластик |
| Вес, г | 207.7 |
| Габаритные размеры (ШxВxГ), мм | 60.3x99x75 |
| Диапазон рабочих температур, °С | -40...+75 |
| Напряжение питания, В | 12..48 |
| Потребляемый ток, мА | до 1940 |
| Всего последовательных портов | 2 |
| Количество разъемов RS-485 | 2 (1 x RS-232/422 или 2 x RS-485 (2-wire)) |
| Количество разъемов RS-232/422 | 1 (1 x RS-232/422 или 2 x RS-485 (2-wire)) |
| Установленный процессор | NXP i.MX7D |
| Тактовая частота, ГГц | 1 |
| Тип ОЗУ | DDR3 RAM |
| Размер ОЗУ, Мб | 512 |
| Предустановленная ОС | Linux OS (Debian 9) |

Таблица 1.2 – Программно-аппаратные характеристики шлюза UA-5231

| Параметр | Значение |
|---------------------------------|-------------------------|
| Реализация корпуса | Металл |
| Вес, г | 350 |
| Габаритные размеры (ШxВxГ), мм | 117x58x126 |
| Диапазон рабочих температур, °С | -25...+75 |
| Напряжение питания, В | 12..48 |
| Потребляемый ток, мА | до 400 |
| Всего последовательных портов | 3 |
| Количество разъемов RS-485 | 2 |
| Количество разъемов RS-232 | 1 |
| Установленный процессор | ARM Cortex A8 TI AM3354 |
| Тактовая частота, ГГц | 1 |
| Тип ОЗУ | DDR3 1066 |
| Размер ОЗУ, Мб | 512 |
| Предустановленная ОС | Linux Kernel 3.2.14 |

Шлюз UA-5231M обеспечивает получение данных от Modbus TCP/RTU/ASCII устройств и одновременную отправку данных в SCADA, ERP, MES системы через OPC UA и в облачные сервисы (такие как Microsoft Azure, IBM Cloud, Amazon Web Services, Google Cloud или частное облако) через протокол MQTT. На сайте производителя нет подробной информации по поводу способа конфигурации устройства. Стоимость устройства составляет 40362 рубля.

ioThinx 4530 является свободно программируемым контроллером с процессором NXP i.MX7D 1ГГц и операционной системой Linux. Программирование данного контроллера может осуществляться на языках C/C++, Python. Производитель заявляет, что в случае использования ioThinx 4510, данные с полевых устройств могут быть автоматически преобразованы в такие IoT протоколы как SNMP, RESTful API, MQTT и отправляться сразу в облачные сервисы. Стоимость данного модуля составляет от 28950 до 64255 рублей в зависимости от уровня комплектации.

Главные недостатки рассмотренных устройств – это высокая цена и сложность в конфигурировании и связи с облачными сервисами для пользователей, которые не обладают обширными знаниями в области программирования на таких языках как C/C++, Python. Кроме того, главная задача устройств - это сбор данных и контроль, инструментов для проведения диагностики электропривода нет.

2 ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРОЕКТИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ

2.1 Разработка функциональной схемы

На данном этапе проектирования необходимо определиться, какие основные элементы должны входить в состав системы. На разработанной функциональной схеме изображены ключевые элементы проектируемого устройства. Линиями связи указано взаимодействие с сервисами, другими устройствами и указано с помощью каких интерфейсов и протоколов осуществляется обмен данными.

Функциональная схема приведена на рисунке 2.1.

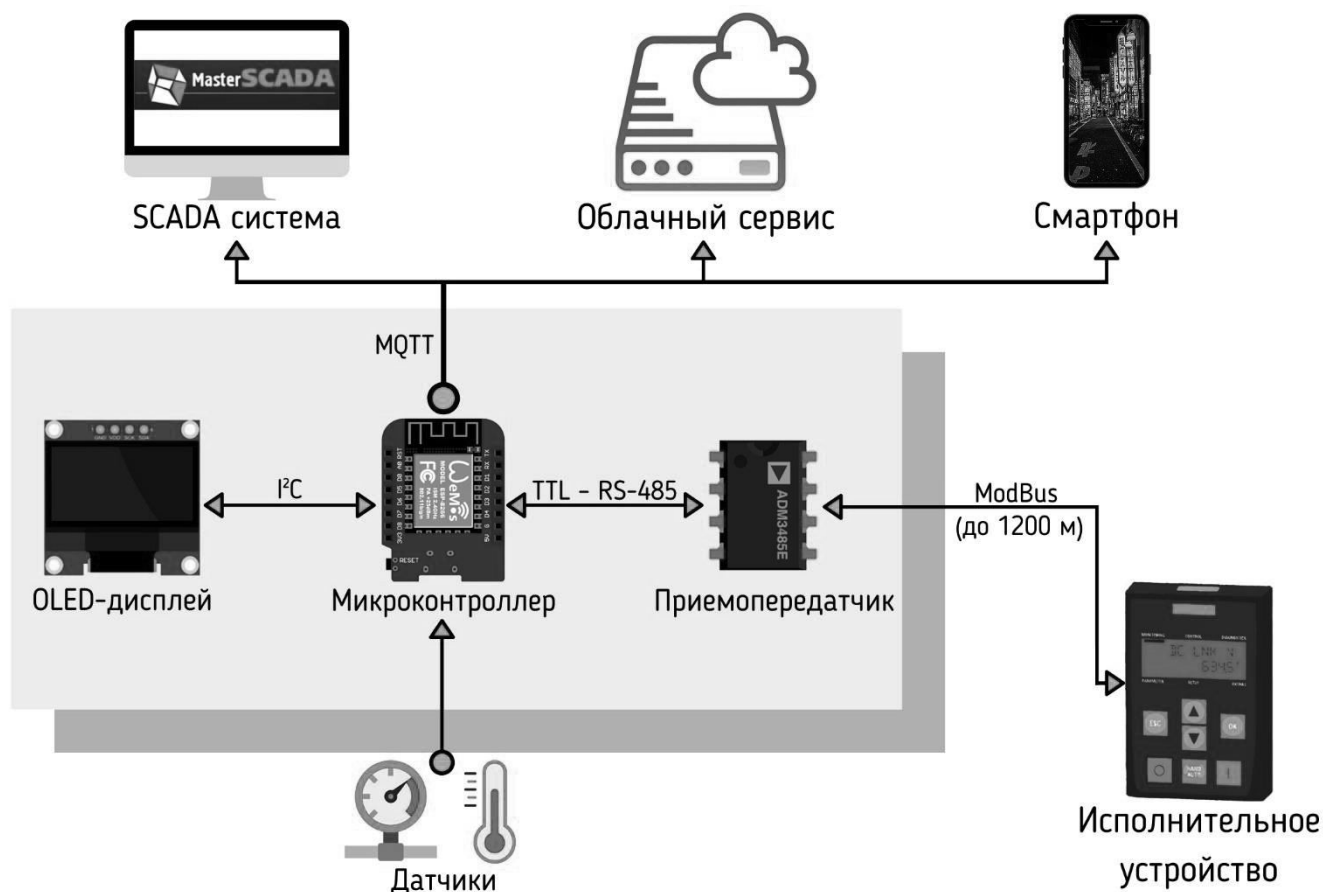


Рисунок 2.1 – Функциональная схема системы

| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |

2.2 Описание процесса работы

Исполнительное устройство (тиристорный преобразователь или преобразователь частоты) является объектом управления. По витой паре он подключается к приемопередатчику. После преобразования, данные (токи, напряжения, частота и другие) передаются на микроконтроллер. При необходимости к микроконтроллеру могут быть подключены дополнительные датчики (температуры, виброакустические и другие). Микроконтроллер, в свою очередь, отправляет полученную информацию на сервер для дальнейшего анализа и обработки данных. Передача данных происходит по беспроводной сети.

Питание микроконтроллера осуществляется от AC/DC преобразователя либо от аккумуляторных батарей 18650, в зависимости от условий расположения устройства.

Информация о состоянии устройства выводится на OLED-экран подключённый к микроконтроллеру по последовательной асимметричной шине I²C.

К разъёму IPEX модуля микроконтроллера подключается внешняя антенна для обеспечения большего диапазона передачи данных.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|------------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 20 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ | | | | |

- Большое количество созданных библиотек для протоколов связи и периферии;
- Шифрование флэш диска.

Немаловажным фактором является то, что ESP8266 имеет возможность работать с многозадачными операционными системами реального времени (ОСРВ) [5]. К ОСРВ предъявляются жесткие временные требования в отличие от распространенных ОС общего назначения (Windows, UNIX-подобные и др.) [6].

Существует большое количество разновидностей модулей на базе микроконтроллера ESP8266. Самым оптимальным вариантом по количеству портов ввода/выхода и конструктивному исполнению является ESP-07 (рисунок 3.1). Он имеет небольшие размеры по сравнению с другими модулями и специально сконструирован для создания мобильных устройств и интернета вещей. Общие технические характеристики модуля представлены в таблице 3.1.

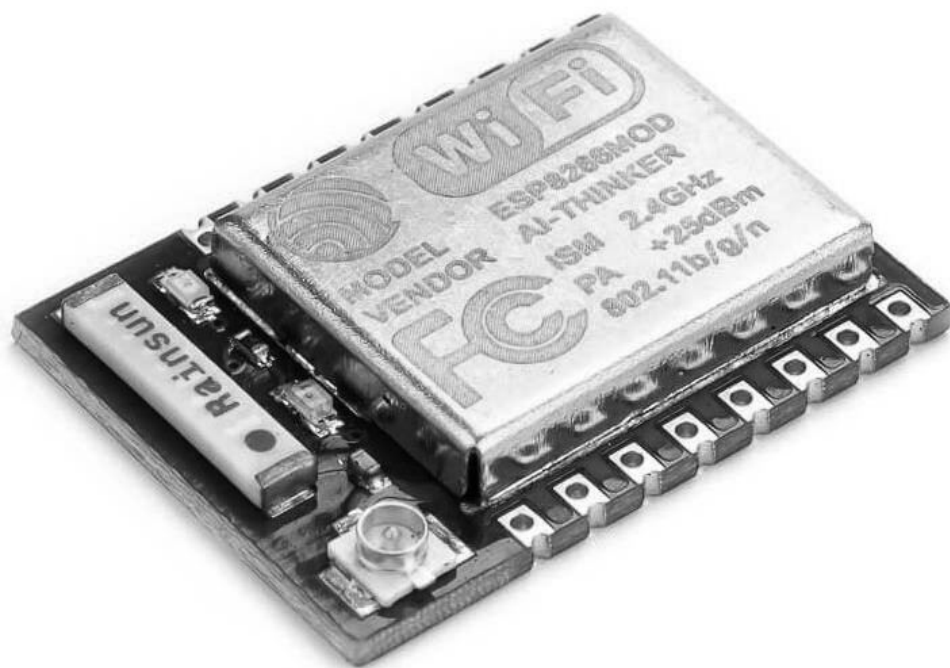


Рисунок 3.1 – Модуль ESP-07

В теории с прибором будет работать любое устройство с поддержкой протокола Modbus (счётчики, датчики, регуляторы, диммеры, ПЛК и др.), если в этом появится необходимость.

3.1.3 Источник питания устройства

Необходимое питание микроконтроллера ESP от 3 до 3,6 В, потребляемый ток до 300 мА в зависимости от выбранного режима.

Такое маленькое входное напряжение позволит питать устройство от одного Li-Ion-аккумулятора типа 18650 у которого рабочее напряжение равняется 3.6 Вольтам.

Кроме этого, благодаря тому, что микроконтроллер ESP8266 поддерживает три режима пониженного потребления: Modem sleep (15 мА), Light sleep (0.4 мА), Deep sleep (15 мкА) [7], ёмкость аккумулятора (3200 мА·ч) позволит питать устройство без подзарядки или смены продолжительное время. Плюсом исполнения устройства с питанием от аккумулятора является автономность. Часто бывает так, что оборудование, к которому подключается прибор, установлено в труднодоступных местах и провести линии питания от сети не представляется возможным.

Но также и имеется возможность запитывать устройство от сети через AC/DC преобразователь с выходным напряжением в 3.3 Вольта. В нашем случае выбран преобразователь HLK-PM03 от фирмы Hi-Link [8] (рисунок 3.3). Его особенностью являются небольшие габариты, которые позволят удобно разместить преобразователь на печатную плату, не занимая большого количества пространства. Технические характеристики модуля представлены в таблице 3.2.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 24 |

5) LoRaWAN и Sigfox - это маломощные беспроводные устройства большой дальности для устройств IoT, которые также охватывают многие километры, но работают в нелицензированных диапазонах.

На рисунке 3.5 наглядно видно функциональное соотношение этих стандартов связи.

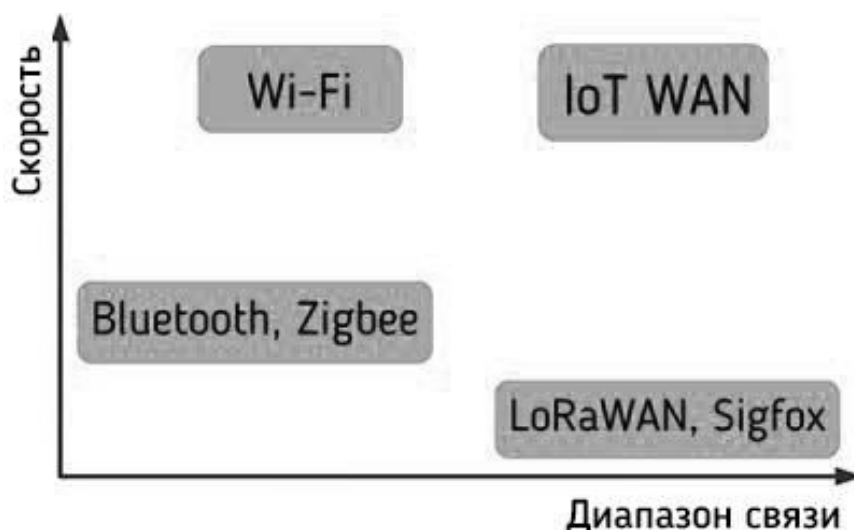


Рисунок 3.5 – Функциональное соотношение стандартов

В таблице 3.4 сравниваются параметры различных технологий беспроводной связи [12].

Таблица 3.4 – Сравнения стандартов беспроводной связи

| Стандарт | Энергопотребление | Диапазон связи | Скорость |
|--------------|-------------------|----------------|-------------------------|
| Bluetooth | Низкое | <3 м | 700 Кбит/с |
| Bluetooth LE | Очень низкое | 5-10 м | 1 Мбит/с |
| LoRaWAN | Низкое | 10 км | 50 Кбит/с |
| NB-IoT | Высокое | Сотовая сеть | 1.8 кбит/с – 7.2 Мбит/с |
| NFC | Очень низкое | <10 см | 400 Кбит/с |
| Sigfox | Низкое | 3–50 км | 100 – 600 бит/с |

Данные линии подтянуты резисторами R6, R7 на 10 кОм для того чтобы установить на них логические уровни. Далее установлен контактный соединитель X2 для подключения устройств.

Разъём XP1 служит для подключения дисплея по шине I2C.

Кнопка SB1 необходима для сброса микроконтроллера. Подтягивающий резисторы R1, R4, R5 были выбраны номиналом 1 кОм.

Светодиод HL1 необходим для индикации питания. Светодиод HL2 служит индикатором передачи данных по беспроводной сети. К анодам светодиодов подключены резисторы R2, R3 номиналом 75 Ом.

Устройство получает питание от источника HLK-PM03 (D1). К блоку питания подключён на входе самовосстанавливающийся предохранитель FU1 на 200 мА, выключатель SA1 и контактный соединитель X1. Источник питания имеет фильтрующий конденсатор C1 на 330 мкФ. Он сглаживают пульсации выходного напряжения.

Принципиальная электрическая схема изображена на чертеже 13.03.02.2020.216.03ЭЗ. Перечень элементов, используемых в схеме приведен в документе 13.03.02.2020.216.03ПЭ.

3.5 Проектирование печатной платы

Разработка печатной платы разделено на следующие этапы:

- 1) Подбор элементной базы и разработка принципиальная схема.
- 2) Прорисовка компонентов. Условно-графическое обозначение, посадочное место, 3D-модель, параметры — составляющие любого компонента.
- 3) Создание схемы. В этом этапе определяются размеры печатной платы и располагаются все компоненты.

- 4) Производство расчётов. На данном этапе необходимо рассчитать толщину проводящего рисунка и минимальную возможную дистанцию между ними в соответствии с ГОСТ.
- 5) Трассировка печатной платы.
- 6) Выдача 3D-модели ПП. Прорисовка 3D модели необходима для проверки правильности посадочных мест всех компонентов и для дальнейшего создания корпуса устройства.
- 7) Подготовка гербер-файлов для изготовления печатной платы.
- 8) Подготовка документации. Выполняется по ГОСТ.

Разработка печатной платы производилась в комплексной системе автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронных средств – Altium Designer.

3.5.1 Расчёт толщины проводников для печатной платы

Прежде чем переходить к проектированию печатной платы, необходимо рассчитать и выбрать минимальную возможную толщину проводящего рисунка печатной платы. Для этого воспользуемся рекомендациями из ГОСТ Р 53429-2009 Платы печатные. Основные параметры конструкции [16].

Главное условие по ГОСТ – это допустимая токовая нагрузка на элементы проводящего рисунка в зависимости от допустимого превышения температуры проводника относительно температуры окружающей среды.

Для фольги это значение от 100 до 250 А/мм², а для гальванической меди от 60 до 100 А/мм².

Разрабатываемая плата должна быть разделена на области по номиналу протекающих токов. В нашем случае это область управляющей логики и силовая часть. Следовательно, необходимо провести расчёты для двух областей.

- 1) Силовая часть.

Пусть толщина дорожки = 35 мкм или 0,035 мм;

Максимальный ток, протекающий по проводящему рисунку с учётом коэффициента запаса = 1 А.

Ширина проводника из таблицы номинальных размеров = 0,45 мм.

Тогда по формуле 1 рассчитаем плотности тока

$$j = \frac{I}{S}; \quad (1)$$
$$j = \frac{1}{0,035 \cdot 0,45} = 63,5 \text{ А/мм}^2.$$

Следовательно, выбранная ширина проводящего рисунка удовлетворяет требованиям ГОСТ для гальванической меди в качестве материала проводника.

2) Логическая часть.

Пусть толщина дорожки также будет равна 0,035 мм;

Максимальный ток, протекающий по проводящему рисунку с учётом коэффициента запаса = 0,25 А.

Ширина проводника из таблицы номинальных размеров = 0,1 мм.

Тогда по формуле 5.1 рассчитаем плотности тока

$$j = \frac{0,25}{0,035 \cdot 0,1} = 71 \text{ А/мм}^2.$$

В итоге, выбранная ширина проводящего рисунка удовлетворяет требованиям ГОСТ для гальванической меди в качестве материала проводника.

3.5.2 Результаты разработки печатной платы

В данной работе разработаны два типа печатной платы. Основная для устройства, которое питается от сети 220 В (рисунок 3.8) и дополнительно для устройства не зависящее от сети, питание в котором производится от аккумуляторов типа 18650 (рисунок 3.9).

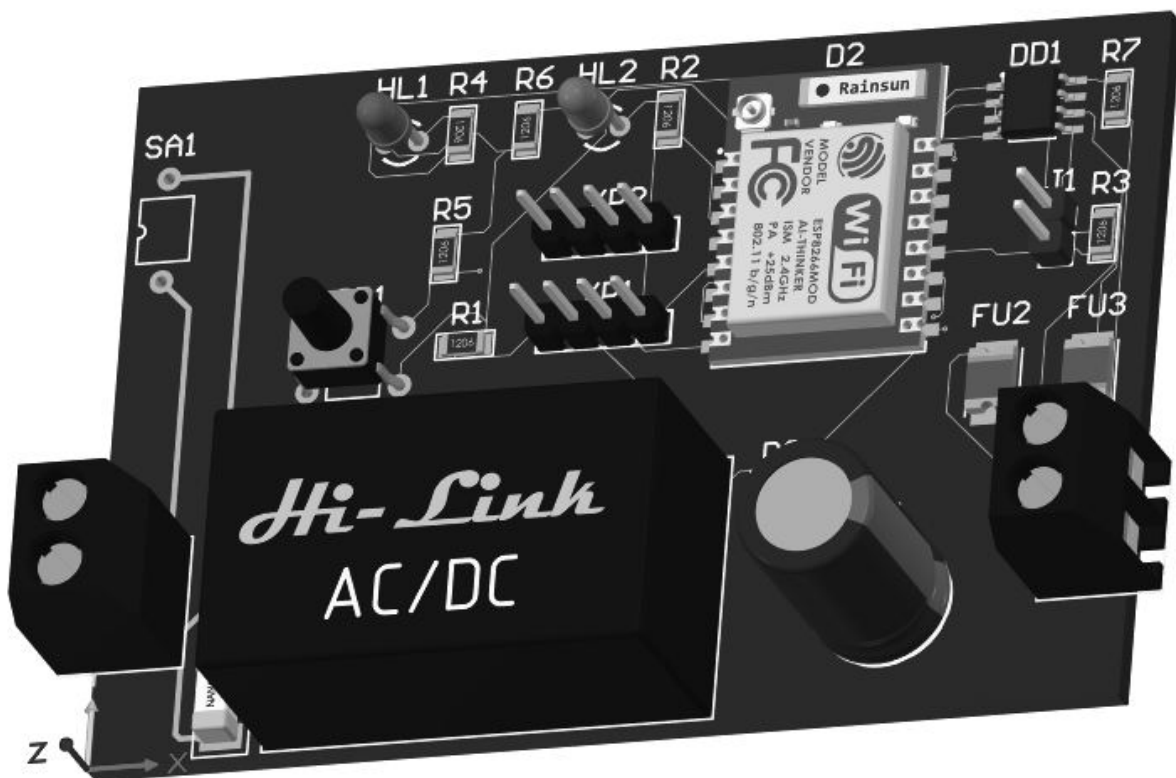


Рисунок 3.8 – 3D вид печатной платы с AC/DC преобразователем



Рисунок 3.9 – 3D вид печатной платы с встроенным аккумулятором 18650

Чертеж печатной платы представлен в документе 13.03.02.2020.216.04ПП

3.6 Разработка корпуса

Для удобного и безопасного использования устройства необходимо спроектировать корпус. В корпусе будет установлена печатная плата со всеми основными элементами, OLED-дисплей для вывода информации, светодиоды для информирования текущего состояния устройства, кнопка подачи питания и сброса настроек микроконтроллера.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

Проектирование корпуса производилось в системе 3D проветривания – SOLIDWORKS. Благодаря интеграции Altium Designer с SOLIDWORKS, можно перенести разработанную 3D модель печатной платы и на её основе начать разработку корпуса устройства. На рисунках 3.10–3.12 показаны результаты проектирования корпуса в оболочке SOLIDWORKS.



Рисунок 3.10 – Корпус в разобранном состоянии

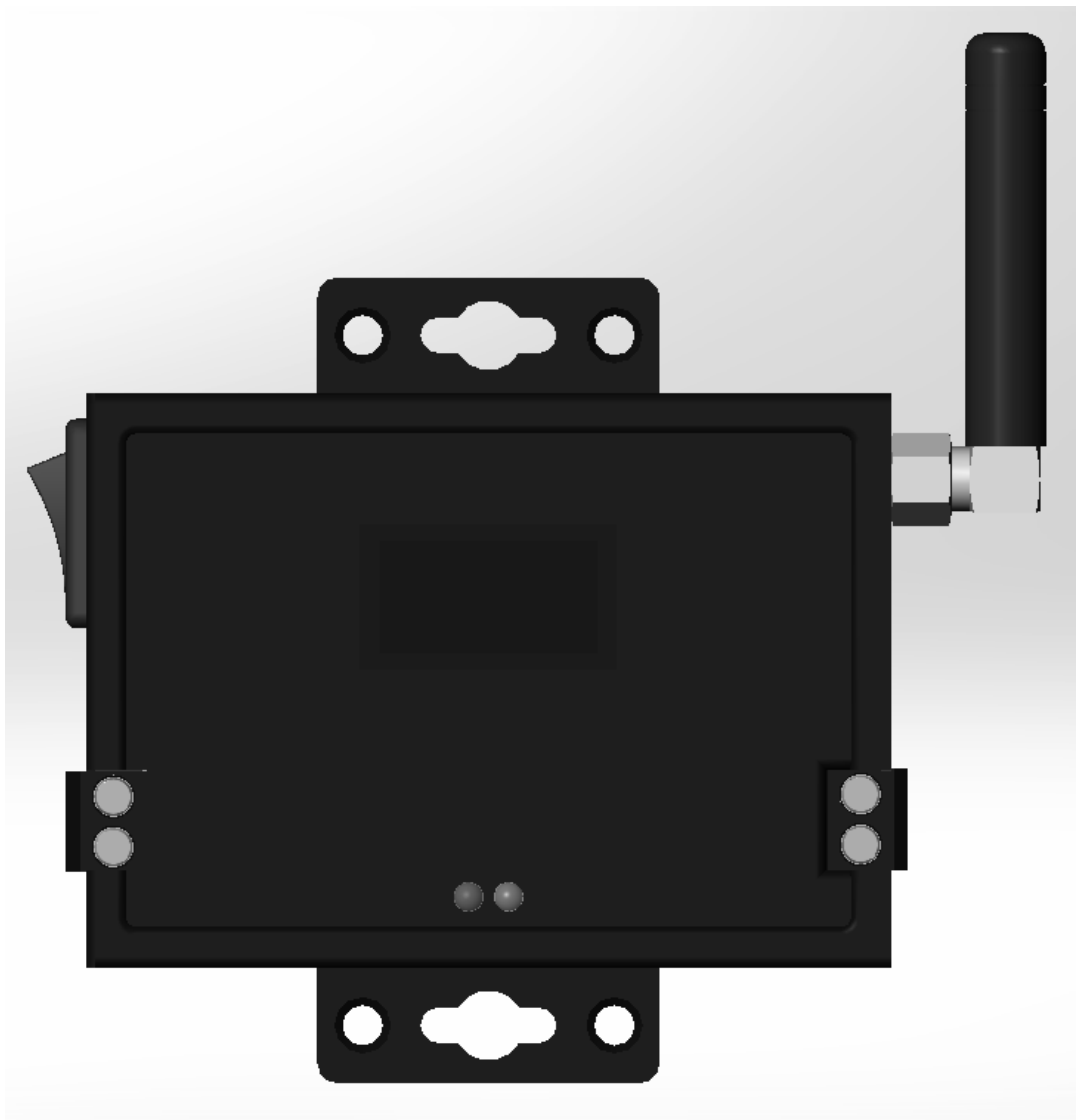


Рисунок 3.11 – Корпус в собранном состоянии, вид сверху

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ

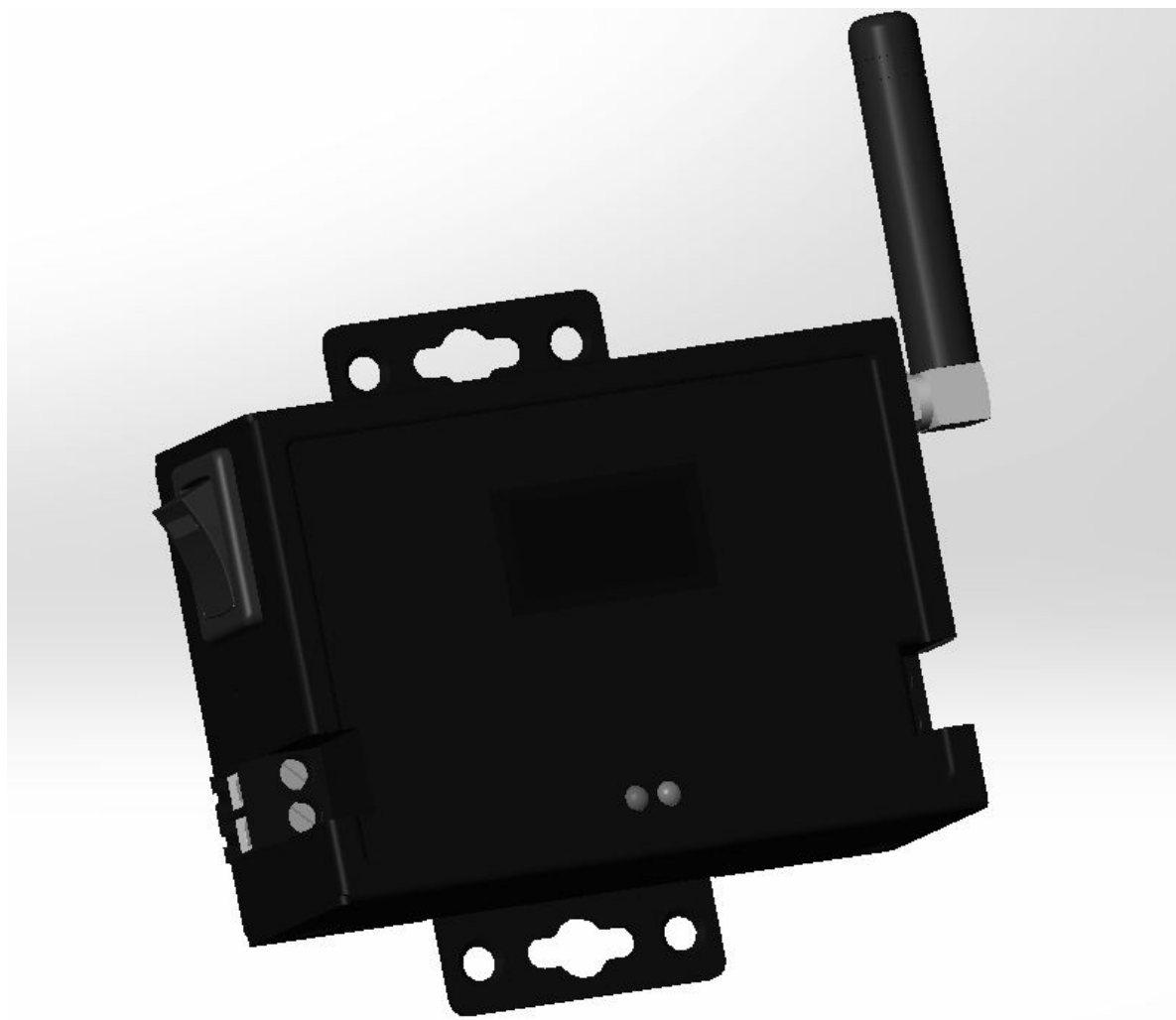


Рисунок 3.12 – Корпус в собранном состоянии

4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для работы устройства разработано программное обеспечение, которое разделено на две составные части:

- 1) Программа микроконтроллера – обеспечивает подключение к исполнительному устройству и полученные данные отправит на сервер по беспроводной сети.
- 2) Программа, установленная на сервер (локальный или облачный), для приёма информации с микроконтроллера, анализа данных и вывода результатов в виде графического интерфейса пользователя.

4.1 Программа управляющего устройства

Первый этап разработки – это создание программы для микроконтроллера.

Чтобы упростить использование микроконтроллера ESP8266 в типовых проектах, возможно использование готовых бинарных файлов, пригодных к прямой заливке в ПЗУ модулей (прошивок). Разработки программы осуществляется в среде NodeMCU.

NodeMCU — проект на основе скриптового языка Lua. Lua — это мощный, быстрый, лёгкий, расширяемый и встраиваемый скриптовый язык программирования [17]. NodeMCU представляет из себя интерпретатор Lua для ESP8622 и поддержку большого количества библиотек для различных устройств, датчиков, дисплеев и т.п. Прошивка умеет исполнять Lua-скрипты как из UART (аналогично AT-командам), так и из внутренней flash памяти. Для загрузки скриптов в flash память поддерживается файловая система. Со стороны Wi-Fi имеются встроенные MQTT протокол и HTTP сервер. Встроена графическая оболочка, что позволяет подключать к ESP8266 графические индикаторы.

| | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|------------------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 44 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ | | | | | |

Чтобы прошить устройство, сначала нужно эту прошивку получить. Документация [18] предлагает несколько вариантов, но самый простой из них — сервис `nodemcu-build.com` (рисунок 4.1), который позволяет, просто выбрав нужные модули, получить готовую прошивку на почту.

Select modules to include

| | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> ADC | <input checked="" type="checkbox"/> file | <input type="checkbox"/> perf | <input type="checkbox"/> Switec |
| <input type="checkbox"/> ADS1115 | <input type="checkbox"/> gdbstub | <input type="checkbox"/> PWM | <input type="checkbox"/> TCS34725 |
| <input type="checkbox"/> ADXL345 | <input checked="" type="checkbox"/> GPIO | <input type="checkbox"/> PWM 2 | <input type="checkbox"/> TM1829 |
| <input type="checkbox"/> AM2320 | <input type="checkbox"/> GPIO pulse | <input type="checkbox"/> RC (no docs) | <input checked="" type="checkbox"/> timer |
| <input type="checkbox"/> APA102 | <input type="checkbox"/> HDC1080 | <input type="checkbox"/> rfswitch | <input type="checkbox"/> TSL2561 |
| <input type="checkbox"/> bit | <input type="checkbox"/> HMC5883L | <input type="checkbox"/> rotary | <input type="checkbox"/> U8G2 |
| <input type="checkbox"/> Bloom filter, requires crypto | <input type="checkbox"/> HTTP | <input type="checkbox"/> RTC fifo | <input checked="" type="checkbox"/> UART |
| <input type="checkbox"/> BME280 | <input type="checkbox"/> HX711 | <input type="checkbox"/> RTC mem | <input type="checkbox"/> UCG |
| <input type="checkbox"/> BME680 | <input type="checkbox"/> I ² C | <input type="checkbox"/> RTC time | <input type="checkbox"/> websocket |
| <input type="checkbox"/> BMP085 | <input type="checkbox"/> L3G4200D | <input type="checkbox"/> Si7021 | <input checked="" type="checkbox"/> WiFi |
| <input type="checkbox"/> CoAP | <input type="checkbox"/> MCP4725 | <input type="checkbox"/> Sigma-delta | <input type="checkbox"/> WiFi monitor |
| <input type="checkbox"/> color utils | <input type="checkbox"/> mDNS | <input type="checkbox"/> SJSON | <input type="checkbox"/> WPS |
| <input type="checkbox"/> Cron | <input type="checkbox"/> MQTT | <input type="checkbox"/> SNTP | <input type="checkbox"/> WS2801 |
| <input type="checkbox"/> crypto | <input checked="" type="checkbox"/> net | <input type="checkbox"/> Somfy | <input type="checkbox"/> WS2812 |
| <input type="checkbox"/> DHT | <input checked="" type="checkbox"/> node | <input type="checkbox"/> SPI | <input type="checkbox"/> WS2812 effects |
| <input type="checkbox"/> encoder | <input type="checkbox"/> 1-Wire | <input type="checkbox"/> struct | <input type="checkbox"/> XPT2046 |
| <input type="checkbox"/> end user setup / Captive Portal / WiFi Manager | <input type="checkbox"/> PCM | | |

Рисунок 4.1 – Выбор модулей прошивки

Перед началом программирования необходимо определиться, какие модули прошивки требуются для создания программы. Так как flash память ограничена, необходимо выбирать только те модули, которые действительно необходимы для работы программы:

- модуль работы с GPIO (General Purpose Input/Output) – поддержка GPIO. Чтение GPIO и управление реле;
- файловый модуль обеспечивает доступ к файловой системе и ее отдельным файлам;

После разработки программы необходимо провести её тестирование и отладку. Для того чтобы убедиться, что все данные отправленные микроконтроллером по протоколу MQTT доходят до брокера, использовался инструмент mqtt.fx.

Для проверки подключения микроконтроллера к modbus slave устройству применялась программа Modbus Slave Simulator.

В конечном итоге, после окончательной отладки, программа прошла все тесты и показала свою работоспособность.

Полный листинг программы представлены в приложении А.

4.2 Программное обеспечение пользователя

Для комфортной работы с устройством, необходимо написать программное обеспечение, которое позволит пользователю настроить работу и получать необходимые данные в понятном и удобном виде. Для этого разрабатывается графический интерфейс пользователя.

4.2.1 Обзор среды разработки Node-RED

Визуализация и управление проектом спроектировано на базе open-source инструмента визуального программирования Node-RED от компании IBM [19].

Данный инструмент программирования, позволяет соединять аппаратные устройства, API и онлайн-сервисы. Программирование в Node-RED происходит в браузере, где можно реализовать различные сценарии и правила автоматизации.

Ключевые особенности оболочки Node-RED:

- 1) Упрощает настройку автоматизации по беспроводной сети.

- 2) Предоставляет удобный инструмент для визуализации и создании интерфейса для главного устройства мониторинга и управления (ПК).
- 3) Возможность запускать ядро на различных платформах – PC, Raspberry Pi или в облаке
- 4) Большое разнообразие готовых библиотек позволяет увеличить функционал системы.
- 5) Возможность создавать архивы и отчеты о работе системы.

Обмен данными между сервером, на котором установлена оболочка Node-RED и микроконтроллером происходят по протоколу MQTT.

Программирование в оболочке Node-Red заключается в соединении между собой звеньев (узлов). Кроме базовых функций, в Node-Red можно сильно расширить функционал, установив дополнительные библиотеки.

Например, для создания визуализации и панелей управления, необходимо установить библиотеку «node-red-dashboard». Для подключения по протоколу Modbus библиотеку «node-red-contrib-modbus-api» и так далее.

На рисунке 4.2 приведён пример части программы для конфигурации подключения по протоколу Modbus, а на рисунке 4.3 продемонстрирован участок программы, отправляющий уведомление о состоянии системы по электронной почте и в мессенджер пользователя.

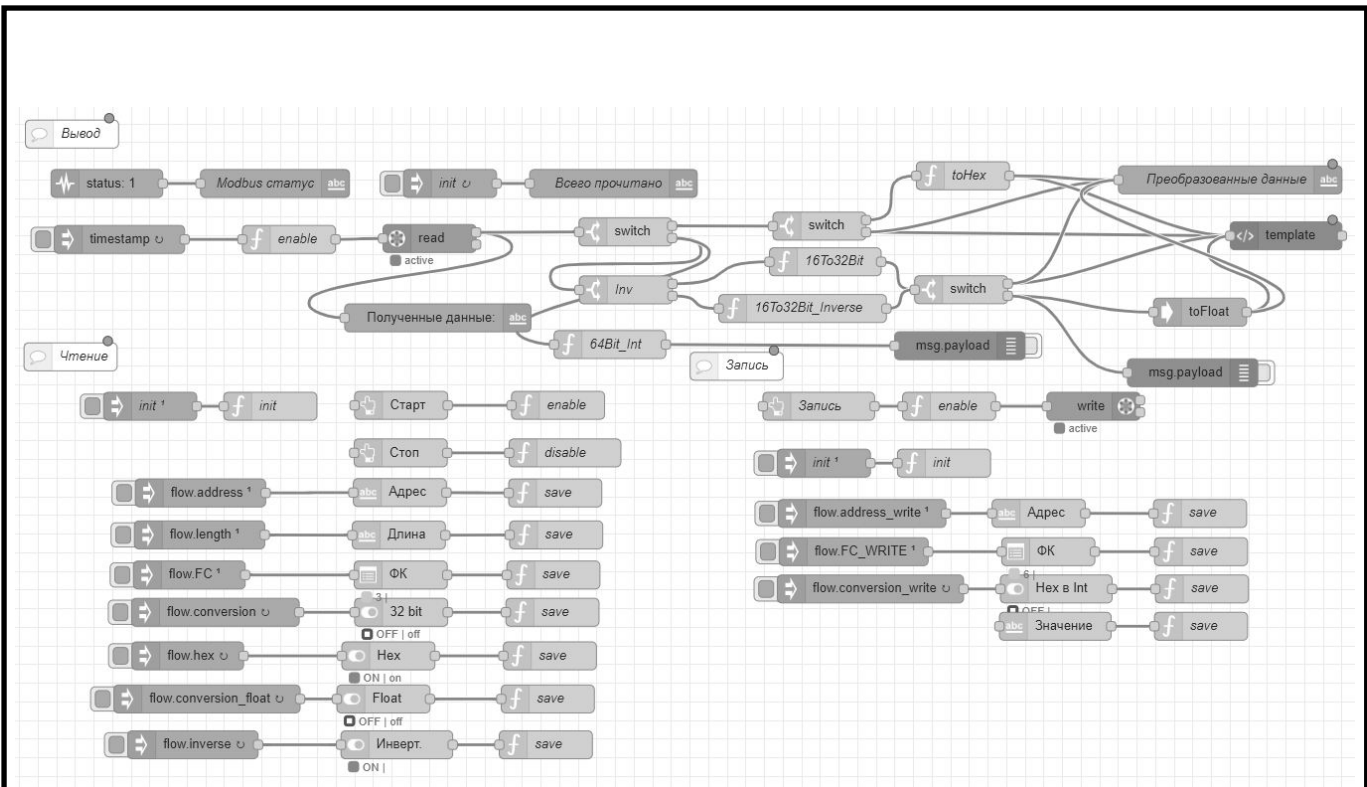


Рисунок 4.2 – Реализация программы для настройки подключения по протоколу Modbus

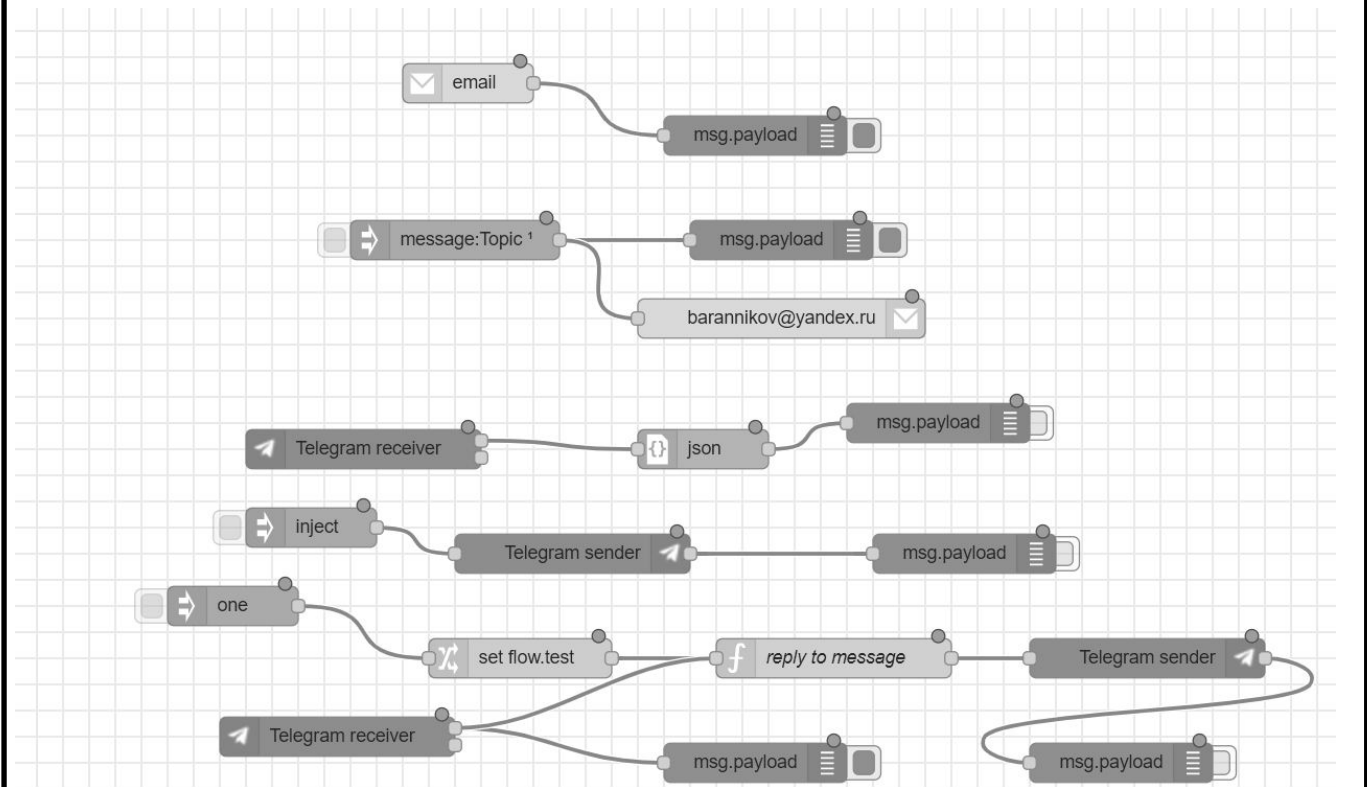


Рисунок 4.3 – Пример программы для уведомления пользователя по электронной почте и мессенджеру Telegram

4.2.3 Результаты разработки

В результате с помощью обмена информацией по принципу подписчик-клиент протокола MQTT и разделению данных в топики создан интерфейс пользователя, который отображает полученные данные с исполнительного устройства в виде графиков или шкалы (рисунок 4.5), а также позволяет производить настройку подключения к устройству без перепрограммирования микроконтроллера (рисунок 4.6). Данная функция позволит упростить работу, если произошла смена оборудования или появилась необходимость в подключении дополнительных устройств.

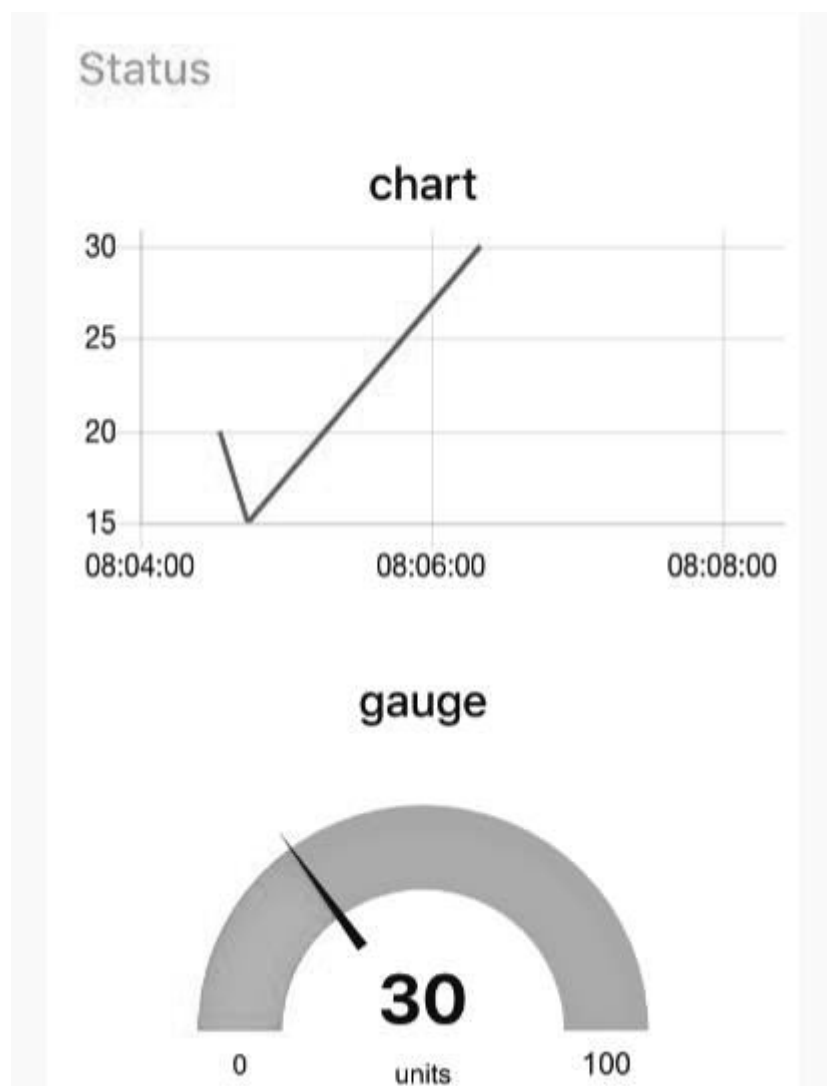


Рисунок 4.5 – Пример отображения графиков в Node-RED

Прикладной протокол «заворачивается» в TLS/SSL, а тот в свою очередь в TCP/IP. По сути данные по прикладному протоколу передаются по TCP/IP, но они зашифрованы. И расшифровать передаваемые данные может только то устройство, которое установило соединение. Для всех остальных, кто получит передаваемые пакеты, эта информация будет бессмысленной, если они не смогут ее расшифровать.

TLS/SSL позволяет достичь высокого уровня безопасности, но реализовать такую схему работы сложнее, чем другие. Дело в том, что при применении TLS/SSL необходимо снабдить подходящими сертификатами все устройства-клиенты. Кроме того, нужно разработать механизм обновлений для поддержания соответствия сертификатов клиентов и брокера во время эксплуатации системы. Для этого использован автоматически обновляемый сертификат Let's Encrypt, сгенерированный с помощью клиента Certbot. Он позволяет полностью автоматизировать процесс получения и продления сертификата.

Таким образом, для использования протоколов SSL и TLS созданы следующие сертификаты:

- Брокера Mosquitto;
- Клиента;
- Корневые от доверенного центра сертификации (Certificate Authority, CA).

В итоге, автоматически обновляемый TLS/SSL-сертификаты Let's Encrypt шифрует трафик. MQTT брокер настроен, защищен и готов к работе.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | | | | | | <i>Лист</i> |
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 56 |

В программах реализован драйвер протокола MQTT. Для получения данных программные продукты могут быть настроены как подписчик. Системы могут принимать по подписке данные в JSON-формате и выделять из них значения по их ключам. Кроме того, можно настроить для публикации тэгов в MQTT брокере. SCADA производит публикацию данных в MQTT-брокере при изменении значения тэга, полученного по OPC, ModBus и другие. Публикация данных также происходит периодически.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 58 |

- низкая трудоемкость диагностических работ (измерений) и простота проведения измерений;
- возможность проведения аналитической обработки полученных результатов измерений за короткое время, с применением вычислительных и программных средств, [21].

Данные критерии были учтены при проектировании устройства диагностики и разработки программного обеспечения.

5.2 Существующие методы диагностики асинхронного двигателя

На сегодняшний день можно выделить несколько методов определения технического состояния и контроля работы асинхронного электродвигателя, получившие широкое распространение на практике:

1) Метод вибродиагностики.

Суть данного метода заключается в анализе вибрационных параметров в различных точках электродвигателя. К вибрационным параметрам относятся виброперемещение, виброускорение и виброскорость. Вибродиагностика позволяет определять дефекты подшипникового узла, эксцентриситета и в меньшей степени – дефекты обмотки статора. Главными недостатками вибродиагностики являются необходимость использования специализированных виброакустических датчиков, сложность их установки и сложность интерпретации результатов.

2) Метод тепловизионного контроля.

Этот метод позволяют достаточно точно определять состояние подшипниковых узлов электрических машин. В качестве датчиков температуры могут быть использованы бесконтактные инфракрасные пирометры. Это позволяет их использовать при отсутствии непосредственного доступа к диагностируемой машине.

Однако для контроля внутренних повреждений изоляции машины они непригодны, т.к. закрытое исполнение приводов не позволяет использовать бесконтактные датчики.

3) Метод диагностики состояния изоляции.

Широко используется при диагностике электрооборудования. Как правило, их использование возможно только при отключенном питающем напряжении. Таким образом, исключается диагностика работающих машин в реальном времени в нормальном режиме их работы.

4) Метод спектрального анализа.

Большое распространение получили также методы спектрального анализа, в которых в качестве диагностических параметров используют значения амплитуды отдельных гармонических составляющих вибрационного сигнала. Это позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов двигателя. Наличие в спектре тока двигателя характерных частот определенной величины свидетельствует о наличии повреждений электрической и/или механической части электродвигателя и связанного с ним механического устройства.

5) Метод диагностики по результатам измерения параметров рабочего режима [22].

Данный метод диагностики технического состояния обмоток статора и ротора асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором использует результаты измерения параметров рабочего режима (фазные токи и напряжения электродвигателя, потребляемая им мощность, частота вращения).

Принцип работы заключается в выполнении оценки технического состояния с использованием симметричных составляющих токов и напряжений статора, а также потребляемой активной мощности и угла наклона механической характеристики электродвигателя в области рабочих скольжений.

В ходе проведённых экспериментов было установлено, что при появлении дефектов в обмотках двигателя в токах статора, скольжении и активной мощности появляются периодические пульсации. Симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей находятся по данным измерений фазных величин. На основании контроля пульсаций в огибающей тока статора представляется возможность определить скольжение асинхронного электродвигателя.

Заключение о месте возникновения (обмотка статора или ротора) и виде возникшего дефекта (обрыв ветвей параллельной обмотки статора и стержней обмотки короткозамкнутого ротора, витковое замыкание, нарушение контактов, паяных или сварных соединений в обмотках статора и ротора) дается на основании анализа совокупности изменения величины критерия диагностирования и параметров рабочего режима электродвигателя, а также по частоте тока обратной последовательности.

В качестве проверки работоспособности разработанной системы был выбран метод непрерывного контроля состояния обмоток статора и ротора асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором по данным измерений фазных токов и напряжений, так как в нём заложены комплексные критерии оценки технического состояния обмоток асинхронного электродвигателя, который позволяет повысить точность диагностирования по сравнению с известными методами.

5.3 Применение метода диагностики по результатам измерения параметров рабочего режима

Для применения способа диагностики с непрерывным контролем состояния обмоток статора и ротора асинхронного двигателя, в оболочку Node-RED был добавлен алгоритм обработки параметров рабочего режима. Данный алгоритм имеет следующую последовательность:

- 1) Программа считывает технические характеристики двигателя, которые были введены в базу данных.
- 2) С преобразователя частоты считываются значения частоты f_1 , начальных фаз токов и напряжений и производится расчёт периода T_1 .
- 3) Определение амплитуды фазных токов в каждый момент времени их фиксации выполняется на основе определения среднеквадратического значения тока для количества дискретных точек, соответствующих периоду сигнала номинальной частоты и взятых слева и справа от текущей i -той точки:

$$I_{mi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=-10}^{10} i_1^2}{\sum_{i=-10}^{10} \sin^2(2\pi \cdot f_1 \cdot t_j + \varphi_0)}}. \quad (2)$$

- 4) Для каждого момента времени фиксации мгновенных значений фазных токов электродвигателя определяются вектора фазных токов:

$$\bar{I}_i = I_{mi} \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t_j + \varphi_0) + j I_{mi} \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t_j + \varphi_0). \quad (3)$$

- 5) По значениям векторов фазных токов электродвигателя, рассчитываются симметричные составляющие прямой \bar{I}_{1i} и обратной \bar{I}_{2i} последовательностей для каждого момента времени t_j :

$$\bar{I}_{1i} = \frac{1}{3} (\bar{I}_{ai} + a \bar{I}_{bi} + a^2 \bar{I}_{ci}); \quad (4)$$

$$\bar{I}_{2i} = \frac{1}{3} (\bar{I}_{ai} + a^2 \bar{I}_{bi} + a \bar{I}_{ci}), \quad (5)$$

где $a = e^{j2\pi/3}$ – фазный множитель.

- 6) Амплитуды составляющих тока прямой I_{1m} и обратной I_{2m} последовательностей за полное время контроля определяются по выражениям:

$$I_{1m} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n i_{1i}^2}; \quad (6)$$

$$I_{2m} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n i_{2i}^2}, \quad (7)$$

где $i_{1i} = \text{real}(\bar{I}_{1i})$ – мгновенное значение составляющей тока прямой последовательности;

$i_{2i} = \text{real}(\bar{I}_{2i})$ – мгновенное значение составляющей тока обратной последовательности.

- 7) Далее рассчитывается величина коэффициента несимметрии фазных токов электродвигателя:

$$k_j = \frac{I_{1m} - I_{2m}}{I_{1m}}. \quad (8)$$

- 8) Величина потребляемой электродвигателем активной мощности P определяется на основании контроля фазных токов и фазных или линейных напряжений по выражению:

$$P = i_a \cdot u_a + i_b \cdot u_b + i_c \cdot u_c. \quad (9)$$

- 9) Для определения величины скольжения асинхронного электродвигателя используется кривая изменения амплитуды фазного тока во времени $I_{1m}(t)$, найденная по выражению (2) и смещенная вниз до пересечения с осью времени t :

$$I_{xi} = I_{mi} - I_{m. \text{ср.}}, \quad (10)$$

где $I_{m. \text{ср.}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I_{mi}$ – среднее значение амплитуды фазного тока электродвигателя.

- 10) Находится период колебаний $t_{\text{кол}}$ амплитуды фазного тока и рассчитывается величина скольжения s электродвигателя по выражению:

$$s = \frac{1}{t_{\text{кол}}}, \% \quad (11)$$

- 11) Определяется критерий наклона характеристики k_p , характеризующий крутизну механической характеристики асинхронного электродвигателя в области рабочих скольжений.

Так как при наличии оборванных стержней короткозамкнутого ротора скольжение s двигателя увеличивается при той же величине нагрузки, то указанное отношение будет уменьшаться по сравнению с его значением для исправного двигателя. Такой же характер изменения крутизны указанной характеристики будет иметь место и при понижении напряжения. Поэтому вводится коррекция предлагаемого критерия с учетом квадрата отношения номинального напряжения и напряжения статора в опыте. В относительных единицах выражение для критерия наклона характеристики имеет вид:

$$k_p = \left(\frac{P}{P_{\text{НОМ}}} \right) \cdot \left(\frac{s}{s_{\text{НОМ}}} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U} \right)^2, \quad (12)$$

где s – определённое в результате эксплуатации значение скольжения;

U – определённое в результате эксплуатации значение напряжения статора.

- 12) В качестве комплексного критерия диагностирования асинхронного электродвигателя используется коэффициент его исправного состояния, который определяется как:

$$k_d = \frac{c_i k_i - c_p k_p}{c_i + c_p}, \quad (13)$$

где c_i и c_p – весовые коэффициенты, равные $1 \div 3$, которые в дальнейшем могут быть уточнены на основе опыта эксплуатации.

Для исправного двигателя $k_d = 1$. Отклонение этого параметра в сторону понижения от единицы свидетельствует о наличии дефектов обмоток асинхронного электродвигателя.

- 13) В конечном итоге полученные и рассчитанные значения выводятся в режиме онлайн. По этим данным строятся графики.

Используя методику, приведённую в работе [23], можно выявлять дефекты механической части (в том числе, эксцентриситет).

В таблице 5.1. сравниваются значения параметров для асинхронных двигателей с повреждениями и при нормальном состоянии.

Таблица 5.1 – Связь диагностируемых дефектов

| Дефект | Ток в поврежденной фазе | Ток в целой фазе |
|------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Витковое замыкание в фазе обмотки статора | $\geq 1,1I_n$ | $\leq 1,05I_n$ |
| Обрыв одной параллельной ветви обмотки статора | m=1 | 0 |
| | m=2 | 0,6I _n |
| | m=3 | 0,75I _n |
| | m=4 | 0,82I _n |
| Обрыв одного стержня КЗР | Пульсации тока статора | |
| Дефекты механической части | Пульсации тока статора | |
| Эксцентриситет | $\cos \varphi \uparrow$ (на х.х.) | |

На рисунке 5.1 изображена панель контроля. На рисунке 5.2 приведён пример вывода характеристик.

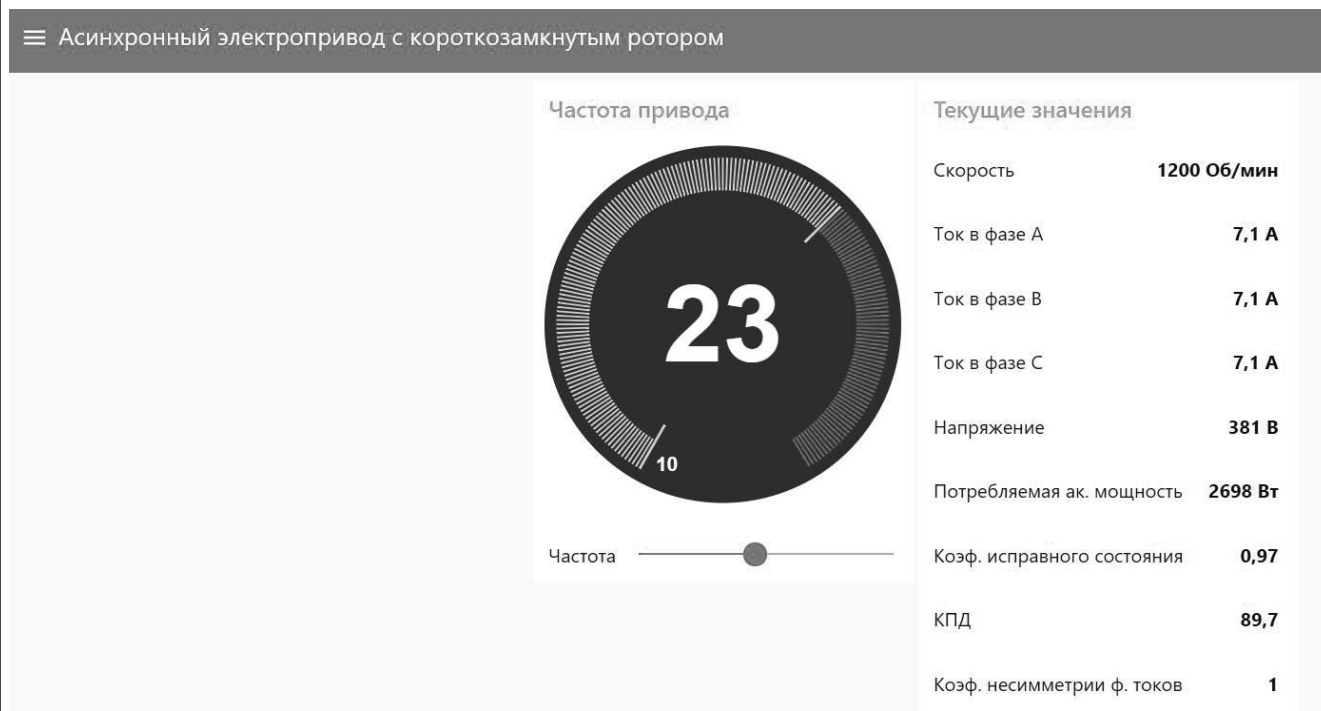


Рисунок 5.1 – Данные полученные при тестировании алгоритма

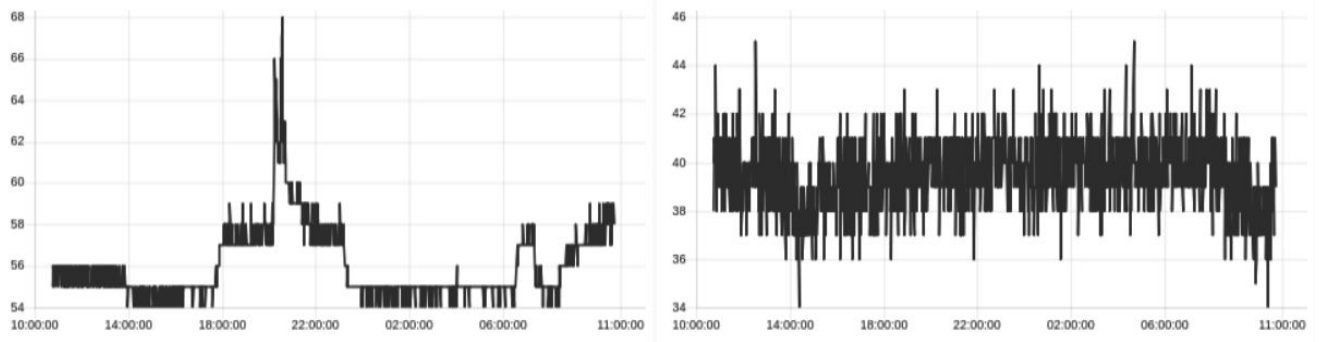


Рисунок 5.2 – Пример построенных характеристик

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выпускного квалификационного проекта спроектировано электронное устройство для снятия параметров автоматизированного электропривода и их передачи по беспроводным сетям с помощью технологий промышленного интернета вещей. Для разработки устройства была проведён выбор элементной базы, созданы функциональная и принципиальные схемы. Итогом разработки стало проектирование печатной платы и корпуса электронного устройства.

В свою очередь для микроконтроллера ESP8266, установленного в устройство, разработана программа на языке программирования Lua.

Для создания сервиса контроля и диагностики автоматизированного электропривода использовалась среда разработки проектов интернет вещей Node-RED. С помощью данного инструмента был создан сервис, который позволяет выполнять следующие функции: учёт базы данных электроприводов, установленных на предприятии, сбор и анализ полученных данных по протоколу MQTT, оценка состояния агрегатов, определение имеющихся дефектов, формирование отчётов и вывод результатов диагностики.

Для обеспечения информационной безопасности была предусмотрена система защиты данных на базе криптографических протоколов TLS и SSL.

Кроме разработанного сервиса, устройство можно подключить к SCADA-системам, которые поддерживают протокол MQTT, такие как WinCC Open Architecture, MasterSCADA 4D и другие. С каждым годом количество систем, поддерживающих протокол MQTT растёт.

Устройство может быть применено как в промышленности, так и в учебных целях для изучения новых технологий в области промышленного интернета вещей.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 68 |

Для проверки качества спроектированного устройства и разработанных программ была использована методика диагностики асинхронного короткозамкнутого электропривода по результатам измерения параметров рабочего режима. В программу был добавлен алгоритм данного метода.

Внедрение разработанного устройства и программного сервиса обеспечит непрерывный автоматический контроль за состоянием электрооборудования.

В результате этого будет сокращено количество непредвиденных случаев вывода из строя электрооборудования, приводящие к нарушению непрерывности технологических процессов с последующим браком продукции, затратам на восстановление и ремонт электродвигателей, а также на восстановление нормальных технологических процессов производства. В свою очередь внедрение системы позволит снизить до минимума ущерб от этих последствий за счет раннего обнаружения зарождающихся дефектов и повышению безопасности на производстве.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 69 |

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Schwab, K. Shaping the Future of the Fourth Industrial Revolution / K. Schwab, N. Davis – VPT, 2014. – 446 p. – ISBN 0996025510.
2. Liu, S. Internet of Things - Statistics & Facts / S. Liu. – <https://www.statista.com/topics/2637/internet-of-things/> (дата обращения: 10.04.2020).
3. Bahga, A. Internet of Things: A Hands-On Approach / A. Bahga, V. Madiseti. – Currency, 2018. – 288 p. – ISBN 1984822616.
4. Галеев, А. Популярность промышленного интернета вещей увеличила риски для бизнеса / А. Галеев. – <https://cnews.ru/link/n447301> (дата обращения: 26.04.2020).
5. Barry, R. Using the FreeRTOS Real Time Kernel: A Practical Guide / R. Barry. – 2010. – 172 p. – ISBN 978-1-4461-6914-8.
6. Курниц, А. FreeRTOS — операционная система для микроконтроллеров / А. Курниц // СПб.: Компоненты и Технологии. — 2011. — № 2 – С. 96-100.
7. ESP-07 User Manual. AI-Thinker Co.,Ltd. – https://www.rfsolutions.co.uk/downloads/1494602250ESP-07S_Datasheet.pdf (дата обращения: 10.04.2020).
8. HLK-PM03 Ultra-compact module power Data Sheet. Hi-Link. – <https://www.mikrocontroller.net/attachment/349613/HLK-PM03.pdf> (дата обращения: 10.04.2020).
9. Modbus Protocol. Trexon Inc. – http://www.interlog.com/~speff/usefulinfo/modbus_protocol.pdf (дата обращения: 10.04.2020).
10. Яшкардин, В. RS-485 - стандарт передачи данных по последовательному симметричному каналу / В. Яшкардин. – <http://www.softelectro.ru/rs485.html> (дата обращения: 10.04.2020).

11. ADM3485E Data Sheet. Analog Devices – <https://static.chipdip.ru/lib/143/DOC000143984.pdf> (дата обращения: 10.04.2020).
12. Russia, S. Smart City Networks: Through the Internet of Things/ S. Russia, P. Pardalos. – Springer, 2017. – 231 p. – ISBN 9783319613123.
13. Плотников, О. Что такое LoRaWan / О. Плотников. – <https://habr.com/ru/company/nag/blog/371067/> (дата обращения: 10.04.2020).
14. Вишневский, В. М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневский, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. Л. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 595 с.
15. Что такое MQTT и для чего он нужен в IoT? Описание протокола MQTT – <https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/chto-takoe-mqtt/> (дата обращения: 09.04.2020).
16. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 8 с.
17. Гладыш, А. Основы декларативного программирования на Lua / А. Гладыш – <https://habr.com/ru/post/77413/> (дата обращения: 21.05.2020).
18. NodeMCU Documentation – <https://nodemcu.readthedocs.io/> (дата обращения: 21.05.2020).
19. About Node-RED – <https://nodered.org/about/> (дата обращения: 09.04.2020).
20. Бугеря, Т.И. Анализ способов диагностики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором / Т.И. Бугеря – <http://masters.donntu.org/2017/etf/bugeria/diss/index.htm> (дата обращения: 21.05.2020).
21. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.С. Петухов, В.А. Соколов // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 1(31). – С. 50–52.

22. Сивокобыленко, В.Ф. Диагностика асинхронного электропривода по данным измерений рабочего режима / В.Ф. Сивокобыленко, Д.В. Полковниченко, К.А. Кукуй – http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/7204/1/7_2003.pdf. (дата обращения: 21.05.2020).

23. Meshgin, H. Effects of air-gap eccentricity on the power factor of squirrel cage induction machines / H. Meshgin, J. Milimonfared // International conference on electrical machines (ICEM-2002), Old St. Jan Conference Center, Brugge, Belgium, Conference Record. – 2002.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | | | | | <i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 72 |

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг программы:

```
-----  
--Наименование: Программа управляющего устройства  
--Разработал: Баранников Максим Юрьевич  
--Группа: П-477  
--Дата: 22.05.2020  
-----  
  
-----  
--init.lua  
-----  
-- Файл для последующего запуска  
local runfile = "setglobals.lua"  
-- Если файла нет - переименовываем init.lua  
-- чтобы не войти в бесконечный цикл перезагрузки  
tmr.create():alarm(5000, 0, function()  
  if file.exists(runfile) then  
    dofile(runfile)  
  else  
    print("No ".. runfile..", Rename init.lua!")  
    if file.exists("init.lua") then  
      file.rename("init.lua", "_init.lua")  
      node.restart()  
    end  
  end  
end)  
  
-----  
-- setglobals.lua  
-----  
dat = {}  
dat.broker = false  
myClient = "test001"  
killtop = {}  
dofile('setmqtt.lua')  
  
-----  
-- wifi.lua  
-----  
do  
wifi.setmode(wifi.STATION)  
wifi.sta.clearconfig()  
local scfg = {}  
scfg.auto = true  
scfg.save = true
```

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

ЮУрГУ-13.03.02.2020.216.01ПЗ

Лист

73