

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН  
ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика М.С. Осими**

УДК 681.5; 64.066.82

На правах рукописи



САЙФИДДИНЗОДА ОДИЛДЖОН САЙФИДДИН

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ  
ЕГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание учёной степени доктора философии  
(PhD)- доктора по специальности 6D071800 – Электроэнергетика  
(6D071804 - Энергетические системы и комплексы)

**Научный руководитель –  
кандидат технических наук,  
доцент Абдуллозода Р.Т.**

Душанбе – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ</b> .....  | 4  |
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....   | 7  |
| <b>1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ</b>   |    |
| <b>ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....   | 14 |
| 1.1. Основные показатели надежности и безопасности<br>обслуживания электрооборудования .....                                | 14 |
| 1.2. Анализ методов оценки показателей надежности<br>электрооборудования.....   | 17 |
| 1.3. Факторы, влияющие на надежность и безопасность<br>электрооборудования.....   | 23 |
| 1.4. Взаимосвязь показателей надежности<br>электрооборудования и безопасности при его обслуживания .....                    | 26 |
| 1.5. Заземляющее устройство как элемент, обеспечивающий надежность<br>и безопасность обслуживания электрооборудования ..... | 27 |
| 1.6. Обзор существующих методов проверки состояния<br>заземляющих устройств .....   | 33 |
| 1.7. Задачи исследования.....   | 50 |
| <b>2. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ СЕРИИ</b>  |    |
| <b>ATMEL И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ</b> .....  | 52 |
| 2.1. Особенности микроконтроллеров AVR.....   | 52 |
| 2.2. Технические характеристики микропроцессора портов<br>семейства Mega.....   | 54 |
| 2.3. Набор периферийных устройств, архитектура ядра<br>и описание портов микроконтроллеров.....                             | 56 |
| 2.4. Основные характеристики микроконтроллера типа ATmega .....   | 60 |
| 2.5. Программаторы .....  | 72 |
| 2.6. Датчики влажности грунта.....  | 78 |

|   |            |
|---|------------|
| 2.7. Датчик переменного тока .....  | 82         |
| 2.8. GSM-модуль .....   | 84         |
| 2.9. Выводы.....  | 86         |
| <b>3. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ<br/>НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЕГО БЕЗОПАСНОСТИ<br/>ОБСЛУЖИВАНИЯ.....</b>                              | <b>87</b>  |
| 3.1. Общие сведения .....   | 87         |
| 3.2. Разработка принципиальной электрической схемы автоматизированной<br>системы оценки надежности электрооборудования и его безопасности<br>обслуживания ..... | 88         |
| 3.3. Разработка компьютерной модели автоматизированной системы .....  | 90         |
| 3.4. Разработка автоматизированной системы оценки надежности<br>и безопасности обслуживания электрооборудования.....  | 93         |
| 3.5. Программное обеспечение автоматизированной системы .....   | 97         |
| 3.6. Проверка работоспособности автоматизированной системы оценки<br>надежности и безопасности .....  | 118        |
| 3.7. Оценка вероятности повышения показателей надежности<br>электрооборудования и безопасности обслуживания.....  | 124        |
| 3.8. Разработка инструкции по эксплуатации<br>автоматизированной системы.....   | 129        |
| 3.9. Выводы.....  | 131        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>   | <b>132</b> |
| <b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>   | <b>133</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>  | <b>151</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>  | <b>152</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.....</b>  | <b>153</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....</b>   | <b>154</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....</b>  | <b>155</b> |

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

|              |  |
|--------------|--|
| <b>АЛУ</b>   | – арифметико-логическое устройство   |
| <b>АЦП</b>   | – аналого-цифровой преобразователь   |
| <b>ВЧ</b>    | – высокочастотный  |
| <b>ДЗЗ</b>   | – двойное замыкание на землю   |
| <b>ЖК</b>    | – жидкокристаллический   |
| <b>ЗУ</b>    | – заземляющее устройство   |
| <b>КЗ</b>    | – короткое замыкание   |
| <b>КРУН</b>  | – комплектные распределительные устройства   |
| <b>МТЗ</b>   | – максимальная токовая защита  |
| <b>НН</b>    | – низкое напряжение  |
| <b>НПК</b>   | – научно-практическая конференция  |
| <b>НТК</b>   | – научно-техническая конференция   |
| <b>ОЗЗ</b>   | – однофазное замыкание на землю  |
| <b>ОЗУ</b>   | – оперативное запоминающее устройство  |
| <b>ОПН</b>   | – ограничитель перенапряжений  |
| <b>ОРУ</b>   | – открытое распределительное устройство  |
| <b>ПЗУ</b>   | – постоянное запоминающее устройство   |
| <b>ПК</b>    | – персональный компьютер   |
| <b>ПУ</b>    | – периферийные устройства  |
| <b>ПТЭЭП</b> | – Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии |
| <b>ПУЭ</b>   | – Правила устройства электроустановок  |
| <b>РЗА</b>   | – релейная защита и автоматика   |
| <b>ТП</b>    | – трансформаторная подстанция  |
| <b>РТ</b>    | – Республика Таджикистан   |
| <b>РУ</b>    | – распределительное устройство   |

|                 |   |
|-----------------|---|
| <b>РФ</b>       | – Российская Федерация                                    |
| <b>УЗО</b>      | – устройство защитного отключения                         |
| <b>УРОВ</b>     | – устройство резервирования отказа выключателя            |
| <b>ЭС</b>       | – энергетическая система                                  |
| <b>ADC</b>      | – Analog-to-digital converter                             |
| <b>AVR</b>      | – Advanced Virtual RISC                                   |
| <b>Bascom</b>   | – Basic Compiler (компьютерная программа)                 |
| <b>CAN</b>      | – Controller Area Network                                 |
| <b>CMOS</b>     | – Complementary metal–oxide–semiconductor                 |
| <b>COM port</b> | – Communication port                                      |
| <b>CPU</b>      | – central processing unit                                 |
| <b>C++</b>      | – язык программирования                                   |
| <b>DIP</b>      | – Dual In-Line Package (тип корпуса микросхемы)           |
| <b>DSP</b>      | – Digital Signal Processing (цифровая обработка сигналов) |
| <b>EEPROM</b>   | – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory     |
| <b>GND</b>      | – минус питания   |
| <b>GPIOR</b>    | – General Purpose Input/Ouput                             |
| <b>GPS</b>      | – Global Positioning System                               |
| <b>GSM</b>      | – Global System for Mobile Communications                 |
| <b>IEEE</b>     | – Стандарт касающихся локальных вычислительных сетей      |
| <b>IDC</b>      | – Insulation–Displacement Connector                       |
| <b>ISP</b>      | – Interface Segregation Principle                         |
| <b>LCD</b>      | – Жидкокристаллический дисплей                            |
| <b>LIN</b>      | – Local Interconnect Network                              |
| <b>LPT</b>      | – Line Print Terminal                                     |
| <b>MISO</b>     | – Master In Slave Out (выход для передачи данных)         |
| <b>MOSI</b>     | – Master Out Slave Input (выход для передачи данных)      |
| <b>MSU</b>      | – Multipoint Control Unit                                 |

|                   |  |
|-------------------|--|
| <b>NVM</b>        | – Non-Volatile Memory (энергонезависимая память)                         |
| <b>PROTEUS</b>    | – Пакет программ для автоматизированного проектирования электронных схем |
| <b>PWB</b>        | – Pulse-width modulation (широко-импульсная модуляция)                   |
| <b>RC</b>         | – электрическая цепь, состоящая из конденсатора и резистора              |
| <b>RISC</b>       | – Reduced instruction set compute  |
| <b>Rx</b>         | – Receive (приемник)   |
| <b>SCK</b>        | – Serial Clock (последовательный тактовый сигнал)                        |
| <b>SPI</b>        | – Serial Peripheral Interface (SPI bus)                                  |
| <b>SIM-карта</b>  | – Subscriber Identification Module (модуль идентификации абонента)       |
| <b>SMS</b>        | – Short Message Service  |
| <b>TC</b>         | – Timer Counter (таймер/счетчик)   |
| <b>TQFP</b>       | – Thin Quad Flat Pack (тип корпуса микросхемы)                           |
| <b>TWI</b>        | – Two-wire Serial Interface  |
| <b>Tx</b>         | – Transmit (передача)  |
| <b>UART</b>       | – Universal asynchronous receiver/transmitter                            |
| <b>USB</b>        | – Universal Serial Bus   |
| <b>USB Type-C</b> | – модификации аппаратной реализации интерфейса USB                       |
| <b>VCC</b>        | – плюс питания   |
| <b>XTAL</b>       | – вывод для подключения кварцевого резонатора                            |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования:** Современные тенденции развития электроэнергетики требуют ускоренной автоматизации технологического процесса, обеспечения безопасности и высокого уровня надежности энергетических установок. Надежность электрооборудования обеспечивается за счет применения новых технических средств и современных методов диагностики энергетических установок. По сути, надежность считается способностью электрооборудования выполнять заданные функции при сохранении заводских характеристик в течение установленного срока годности. Однако при эксплуатации электрооборудования возникают различные технические проблемы, которые влияют на надежность электрооборудования и безопасности его обслуживания.

Наиболее существенно влияющими факторами на снижение надежности электрооборудования и его безопасности обслуживания считаются несвоевременное проведение диагностики технического состояния электрических аппаратов и их неправильность эксплуатации в различных ненормальных режимах. Также, ухудшение надежности и условий электробезопасности может возникнуть при выполнении монтажных и пусконаладочных работ. На практике для обеспечения надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания применяют различные методы и средства защиты. В том числе для повышения показателей надежности электрооборудования и улучшения условий их безопасности применяют систему релейной защиты и автоматики, систему контроля состояния изоляции электрических сетей, технологическую автоматику, заземляющее устройство (ЗУ) и т.п. Следовательно ЗУ является одним из наиболее распространённых элементов, которое необходимо для обеспечения надежности электрооборудования и безопасности их обслуживания.

Надежное функционирование заземляющих устройств связано с режимами работы электроустановок и соблюдением регламента проведения диагностических работ по их техническому состоянию.

Существует защитное и рабочее заземление, которые предназначены соответственно для обеспечения электробезопасности и нормального режима работы электроустановок. Электробезопасность при помощи защитного заземления обеспечивают за счет выравнивания потенциалов между основанием и заземляемым оборудованием. Рабочее заземление необходимо для нормального функционирования электрических аппаратов, т.е. обеспечения надежного контакта между нейтралью и землей. В этом случае земля используется как обратный проводник. Таким образом, правильное функционирование заземляющего устройства непосредственно влияет на ресурсное обеспечение надежности и безопасности.

Однако само заземление при эксплуатации сталкивается с различными техническими проблемами, в число которых входит: возрастание сопротивления растеканию тока, ухудшение его коррозионного состояния и т.п.

В настоящее время существует целый ряд действующих нормативно-технических документов для определения фактического состояния заземлителей. Согласно действующим методам для проверки состояния заземлителей требуется проведение измерения множества параметров ЗУ.

Действующие методы проверки состояния заземлителей требуют большого количества финансовых, трудовых и временных затрат. Поэтому для проверки состояния элементов заземлителя без применения дорогостоящих приборов и проведения вскрышных работ необходимо рассматривать возможность применения действующих разработанных математических моделей в устройстве измеряющих их контролирующих параметров.

В настоящее время существует метод для оценки коррозионного состояния элементов ЗУ, при котором можно использовать среднегодовое значение влажности грунта в месте нахождения заземлителя и среднее значение токов, протекающих по вертикальным и горизонтальным заземляющим электродам. Однако данный метод требует постоянного измерения влажности грунта и токов, протекающих по заземлителям. При помощи данного метода можно осуществить автоматический контроль и диагностику состояния элементов

заземляющих устройств с целью проведения оценки надежности электрооборудования и безопасности обслуживающего персонала.

Считаем, что возможность построения программно-аппаратного устройства для измерения и калькуляции среднегодового значения влажности грунта и токов, протекающих через заземляющие электроды с помощью программируемых микроконтроллеров, осуществима. Разработка автоматизированной системы оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя является актуальной научно-технической задачей. Для этого можно использовать современные микроконтроллеры и соответствующие датчики влажности грунта и тока, поскольку программируемые микроконтроллеры имеют функцию аналого-цифрового преобразователя, обработки цифровых сигналов, отображения их значения в дисплеях и передачи цифровых сигналов через GSM-модуль.

**Степень научной разработанности изучаемой проблемы:** в основе данной диссертационной работы лежат исследования таких ученых, как В.И. Щуцкий, А.И. Сидоров, Н.И. Воропай, З.Ш. Юлдашев, А.Я. Абдурахмонов, М.Б. Иноятов, Ю.Б. Гук, В.Г. Китушин, В.А. Непомнящий, Ю.Н. Руденко, М.Н. Розанова, В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс, Р.Н. Карякин, Н.П. Катигроб и других ученых, внесших большой вклад в исследования методов оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания.

**Связь исследования с программами (проектами), научной тематикой:** диссертация соответствует нормативным требованиям ряда программ: Национальной стратегией развития РТ на период до 2030 года (№ 392, от 01.10.2016 г.), Закон РТ об энергетике (№1909, от 19.07.2022 г.), Концепция формирования электронного правительства в РТ (№ 643, от 30.12.2011 г.).

### **Общая характеристика исследования**

**Цель исследования:** обоснование возможности и создание автоматизированной системы оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания при постоянном мониторинге элементов ЗУ.

Для достижения заявленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ факторов, влияющих на надежность электрооборудования и безопасность его обслуживания, и обоснование их взаимосвязи с заземляющими устройствами.
2. Анализ существующих методов оценки показателей надежности и безопасности электрооборудования.
3. Разработка компьютерной и физической модели автоматизированной системы оценки надежности электрооборудований и безопасности его обслуживания.
4. Разработка программного обеспечения автоматизированной системы оценки надежности и безопасности.
5. Оценка надежности электрооборудования и безопасность его обслуживания при применении разработанной автоматизированной системы.

**Объект исследования:** заземляющее устройство электрооборудования различного вида и назначения.

**Предмет исследования:** установление возможностей применения разработанной автоматизированной системы для оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания при постоянном мониторинге состояния элементов ЗУ.

**Методы исследования.** В качестве основных методов исследования применялись методы физического и математического моделирования процессов ухудшения состояния элементов заземлителя, логико-вероятностный метод для оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания. При разработке физической модели устройства для проверки состояния заземлителя использовалась вычислительная система автоматизированного проектирования Proteus.

**Научная новизна исследования** работы заключается в следующем:

1. Разработаны физическая модель (защищена малым патентом РТ, № ТJ 1498) и программное обеспечение (авторское свидетельство РТ, №177) автоматизированной системы для определения состояния элементов

заземлителей, которые применяются в целях оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания.

2. Разработана методика оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя.

**Практическая значимость и реализация ее результатов:**

1. Разработанная автоматизированная система может быть использована для оценки фактического состояния заземляющих устройств электрооборудования различного вида и назначения.

2. Разработанная автоматизированная система позволяет в зависимости от среднегодового значения влажности грунта и токов, протекающих через заземляющие электроды, определить фактическое состояние заземлителя и оценить показатели надежности и безопасности.

3. Полученные автором данные при разработке автоматизированной системы используются в процессе изучения студентами ТТУ имени академика М.С. Осими дисциплин «Энергетическая электроника», «Элементы автоматических устройств», «Электробезопасность» и «Основы микропроцессорной техники» и в ОАО «Барки Точик».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Осуществлена оценка надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания с применением автоматизированной системы.

2. Обосновано взаимосвязь надежности и безопасности электрооборудования с заземляющим устройством.

3. Применены современные микроконтроллеры для разработки автоматизированной системы оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания.

**Достоверность научных положений, полученных результатов и выводов** заключается в корректном использовании математических моделей для определения состояния заземляющих устройств с целью оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертация выполнена в соответствии со следующими разделами Паспорта номенклатуры специальностей научных работников (технические науки): - по специальности 6D071800 – Электроэнергетика (6D071804 - Энергетические системы и комплексы):

**пункт-3 «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии...»** относится к созданной физической модели, которая позволяет проверять состояние элементов заземлителя с целью оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания;

**пункт-4 «Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов...»** относится к разработанной программе обеспечения устройства автоматизированной системы для оценки надежности и электробезопасности в энергетике;

**пункт-7 – «Разработка цифровых и физических методов анализа и мониторинга режимных параметров основного оборудования электростанций, подстанций, электрических сетей, ЭС»** относится обоснование разработанного устройства для проверки состояния элементов заземлителя, которое функционирует за счет постоянного наблюдения исследуемых факторов.

**Личный вклад автора** выражается в самостоятельном написании диссертации, непосредственном участии в постановке вопросов темы исследования, теоретического изучения, экспериментальных работ, формировании выводов и рекомендаций, обобщенного анализа и заключения, а также аprobации и публикации результатов исследования в открытой печати.

**Апробация и реализация результатов диссертации:** основные результаты данной работы были получены при выполнении многочисленных натурных экспериментов на компьютерной и физической модели.

Основные положения диссертационной работы были доложены и получили одобрение на: V международной НПК студентов, магистрантов, аспирантов и соискателей «Наука – основа инновационного развития», г. Душанбе, 2020, 2024гг.; III International Conference “Current Problems Of The Energy Complex: Mining, Production, Transfer, Processing And Environmental Protection” Moscow, 2021; IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry (2023). Ensuring the Safety of a Quarry Distribution Network with a Voltage of 6–35 kV. Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. ICCATS 2022; VI Междунар. НПК «Технологическая независимость и конкурентоспособность Союзного Государства, стран СНГ, ЕАЭС и ШОС», г. Минск, 2023 г.; VII Всероссийской студенческой конференции с международным участием «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи», г. Челябинск, 2023г.; Международной НПК: «Энергетика: состояние и перспективы развития», г. Душанбе, 2023г.; VIII Международной НПК, приуроченной к 65-летию кафедры БЖД ЮУрГУ «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии», г. Челябинск, 2024г.; научных семинарах кафедры РЗиАЭ ТТУ им. акад. М.С. Осими, г. Душанбе, 2020–2024 гг.

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 3 работы – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Президенте РТ и ВАК РФ, 2 работы – в периодическом издании, входящем в базу данных SCOPUS и 8 статей в сборниках НПК и НТК, получены малый патент РТ и авторское свидетельство на компьютерную программу.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы (157 наименований), 5 приложений. Содержит 155 страниц машинописного текста, в том числе 46 рисунков, 8 таблиц.

## 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Основные показатели надежности и безопасности обслуживания электрооборудования

Надежность является основным показателем качества функционирования электрооборудования, и она охватывает вопросы обеспечения *безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости*. Для определения основных показателей надежности электрооборудования рассматриваем их по отдельности [110, 121].

Безотказность – способность непрерывного функционирования электрооборудования в предусмотренных режимах работы в течение установленного срока службы, т.е. безотказность понимается как работоспособное состояние электрических аппаратов.

Для определения работоспособного состояния электрооборудования оценивают их основные параметры, которые характеризуют способность выполнения заданных функций в соответствии с требованиями нормативно-технических документов и стандартов. Нарушение заданных функций при работоспособном состоянии электрооборудования считается ее отказом.

В теории надежности при количественной оценке безотказности электрооборудования используют: количество отказов, вероятность безотказной работы, среднюю наработку и комплексный показатель – коэффициент готовности системы.

Параметр количества отказов  $\omega(t)$  – соотношение математического ожидания числа отказов за достаточную малую его наработку к значению этой наработки. По количеству отказов характеризуют среднее число отказов, в малом ожидаемом интервале времени  $\Delta t$ :

$$\omega(t) = \frac{m(t, t + \Delta t)}{N(t)\Delta t} \quad (1.1)$$

где  $m(t, t + \Delta t)$  – число отказов в интервале времени  $(t, t + \Delta t)$ ;  $N(t)$  – количество восстанавливаемых изделий, находящихся в работоспособном состоянии в момент времени  $t$ .

Среднее значение отказов  $T$  электрооборудования определяют по отношению наработки восстанавливаемой продукции к математическому ожиданию числа его отказов. Ниже приводится выражение для определения среднего числа наработок отказов

$$T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i \quad (1.2)$$

где  $t_i$  – наработка  $i$ -го изделия за время наблюдения;  $m$  – число отказов за время наблюдения всех  $n$  восстанавливаемых изделий.

Для определения вероятности безотказной работы применяют соответствующие математические выражения [93].

Под *долговечностью* электрооборудования понимают сохранение всех характеристик энергетического объекта при установленной системе техобслуживания и ремонта. Как известно, любое электрооборудование имеет определенный ресурс и срок службы, которые под воздействием множества факторов постоянно изменяются. На практике с целью определения среднего ресурса и среднего срока службы электрооборудования применяют различные способы количественной оценки долговечности, основанные на математическом моделировании.

Для оценки надежности электрических аппаратов также учитывают возможность последующих ремонтов электрооборудования – *ремонтопригодность*. Этот показатель энергетического объекта характеризует возможность последующих технических обслуживаний путем ремонта.

Ремонтопригодность электрооборудования характеризуется путем количественной их оценки – в зависимости от интенсивности восстановления  $\mu$ , и оценивают среднее время восстановления  $T_B$ . По выражению оценивают ремонтопригодность электрооборудования [98]:

$$T_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{Bi}, \quad (1.3)$$

где  $t_{Bi}$  – время устранения ( $i$ -го отказа).

Ремонтопригодность электрооборудования является одним из основных показателей ее надежности функционирования.

Также, одним из основных показателей надежности является сохраняемость энергетического объекта, которая характеризуется как способность функционирования после хранения и их транспортировки на дальние расстояния. Хранение и транспортировку электрооборудования выполняют строго по требованиям существующих нормативно-технических документов и стандартов. Поскольку, при неправильном хранении и транспортировке электрооборудования могут повредиться, это сказывается на ухудшении ее надежности. Как следует из вышеприведенного анализа, ухудшение любого рассматриваемого показателя непосредственно повлияет на надежность электрооборудования.

Для оценки сохраняемость электрооборудования используют коэффициента готовности, который характеризует комплексный показатель надежности. Значение этого коэффициента зависит от вероятности того, что, объект окажется в пригодном состоянии, в режимах для которых этот объект не предусмотрен, в произвольном момент времени.

Для оценки сохраняемость электрооборудования воспользуется нижеприведенная формула:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{vi}} \quad (1.4)$$

где  $t_{pi}$  – время работы между отказами;  $n$  – количество отказов электрооборудования;  $t_{vi}$  – время перехода от ненормального режима к нормальному режиму  $i$ -го отказа.

Безопасность электрооборудования характеризуется как свойство энергетического объекта, не создавать ситуацию, причиняющую вред здоровью обслуживающего персонала и окружающей среде. Согласно действующим нормативно-техническим документам и соответствующим стандартам, понятие безопасности связано с технологическим производством, эксплуатацией,

хранением продукции, транспортировкой и ее реализацией, как состояние, при котором отсутствует вред для здоровья людей, животных и окружающей среды. Следовательно, безопасность электрооборудования зависит от технического состояния их элементов. Например, состояние изоляции электроприемников существенно влияет на надежность его функционирования и безопасность обслуживания.

В настоящее время конкретные общепринятые показатели безопасности электрооборудования еще не приняты. Однако с целью количественной оценки безопасности электрических аппаратов используют количество травм, пожаров, взрывов и т.п. В работе [76, 97, 110, 121] приводятся основные параметры электрооборудования, которые используют как основные показатели безопасности, в число которых входит: параметры потока опасных отказов; среднюю наработку на опасный отказ; вероятность безопасного состояния. Как следует из приведенного материала, безопасность оборудования считается ее основным показателем, от уровней которой зависят эксплуатационные характеристики электрических аппаратов.

Таким образом, для оценки надежности электрооборудования учитывают их безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость, а для безопасности – травмы, пожары, взрывы и т.п. Приведенные показатели надежности и безопасности являются переменными, на поведение которых влияют различные факторы окружающей среды и режимов работы электроустановок.

## **1.2. Анализ методов оценки показателей надежности электрооборудования**

Вопрос надежности электрооборудования считается одним из наиболее сложных проблем в электроэнергетике. Поскольку, она влияет на режимы работы электроустановок и безопасность обслуживающего персонала. Из ухудшения показателей надежности возникают ненормальные режимы работы в

электрических сетях и происходят аварии в электроустановках. Обеспечение надежности электрооборудования связано с правильной оценкой ее основных показателей.

В настоящее время для оценки показателей надежности электрооборудования существуют различные методы [73, 74, 78, 129]. При этом в связи с происходящими авариями и ненормальными режимами в электрических сетях все чаще встает вопрос оценки надежности и безопасности [131, 132, 143]. Основными методами оценки показателей надежности являются экспериментальный, аналитический и имитационный. Для обоснования вопроса показателей надежности ниже рассмотрим особенности применения действующих методов оценки надежности. На рис. 1.1 приводятся основные методы оценки показателей надежности.



Рисунок 1.1 – Методы оценки показателей надежности

**Экспериментальные методы** подразделяются на методы наблюдения и испытания надежности. При этом требуется проведение наблюдения или мониторинга основных параметров электрооборудований, характеризующих ее

надежность [71, 72]. Наблюдение необходимых параметров проводят при помощи специальных микропроцессорных измерительных приборов. Стоимость работ, связанных с оценкой надежности эксплуатируемого электроэнергетического оборудования этими методами, в отличие от стоимости испытаний на надежность минимальна [54]. Следовательно, оценка надежности электрооборудования при наблюдении их электрических параметров производят в режиме реального времени.

Как правило, испытание на надежность применяют для ответственных электрооборудований, повреждение которых сопровождается большим количеством финансовых ущербов или человеческих жертв.

В зависимости от срока эксплуатации испытания на надежность делят на ускоренные и продолжительные. Ускоренные испытания проводят путем различных видов моделирования с целью получения необходимой информации о надежности электрооборудования при минимальных временных и финансовых затратах. Продолжительные испытания в большинстве случаев проводят в реальных условиях при эксплуатации электрооборудования в нормальных, ненормальных, аварийных и послеаварийных режимах.

Также, для оценки надежности электрооборудования применяют **аналитические методы**. Сущность данных методов заключается в описании функциональных связей между отдельными факторами, влияющими на показатели надежности. При этом выбирают факторы, наличие или отсутствие которых существенно влияет на надежность электрооборудования.

Наиболее распространенные формулы, использующиеся для расчетов в аналитических методах следующие [52, 54, 98, 99]. Общая формула вероятности безотказной работы:

$$P(t) = e^{- \int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.5)$$

Среднее время безотказной работы электрооборудования:

$$T = \int_0^{\infty} p(t) dt \quad (1.6)$$

При экспоненциальном распределении вероятность безотказной работы в течение времени  $t$  вычисляется по формуле

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1.7)$$

Среднее время безотказной работы

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1.8)$$

В настоящее время существует множество аналитических методов, большинство из которых при применении требует учет громоздких описаний функциональных связей, что приводит к возрастанию трудовых и финансовых затрат. Однако аналитические методы в свою очередь подразделяются на нескольких групп. Ниже приводится многообразие аналитических подходов для оценки показателей надежности электрооборудования [9, 12, 17, 29, 30, 78, 91, 94, 110, 119] :

- таблично-логический метод;
- логико-вероятностные методы;
- логико-аналитический;
- метод расчетных групп;
- метод блок-схем;
- метод минимальных путей и минимальных сечений;
- метод пространства состояний.

Для оценки надежности электрооборудования наиболее пригодным методом считается логико-вероятностный метод оценки надежности электрооборудования. Также, при помощи этого метода возможно оценить безопасность обслуживания электрооборудования.

**Метод имитационных испытаний.** Суть данного метода заключается в применении компьютерных моделей и наблюдении основных показателей надежности электрооборудования. Следовательно, при применении имитационных методов имитируют нормальный режим, аварийный и послеаварийный режим работы в электрических сетях. Также, рассматривается поведение электрооборудования в разных режимах электрических сетей. После

проведения достаточных опытов обрабатывают полученную информацию при помощи компьютерных программ или ручным расчетом. Основным преимуществом данного метода считается его экономичность, поскольку при моделировании любая ошибка не обходится дорого. Однако этот метод не исключен недостатков, основным из которых является то, что при моделировании не всегда полностью учитывают факторы, влияющие на надежность электрооборудования [83].

Основным недостатком вышеперечисленных методов является большое количество времени, которое требуется для решения задач надежности. Этот недостаток существенно увеличивает трудоёмкость научно-технических задач. При этом при оценке показателей надежности электрооборудования необходимо применять методы, позволяющие с меньшими временными затратами решать соответствующие технические задачи.

По сути, во всех вышеприведенных методах электрооборудования присутствует анализ вероятных показателей надежности системы электрооборудования. В рамках данного параграфа рассматривается особенность методов оценки надежности электрооборудования, их достоинства и недостатки. Как отмечается выше, наиболее пригодным методом для оценки надежности электрооборудования считается логико-вероятностный метод. Следовательно, для расчета показателей надежности воспользуемся логико-вероятностным методом.

Таблица 1.1. – Перечень событий и вероятности их отказа [30, 98]

| №<br>р/т | Элемент  | Вероятность<br>отказа,<br>$\lambda$ |
|----------|--|-------------------------------------|
| 1.       | Воздушная линия 35, 110 кВ одноцепная, на 1 км | 0,08                                |
| 2.       | Воздушная линия 35, 110 кВ двухцепная, на 1 км | 0,008                               |
| 3.       | Воздушная линия 6, 10 кВ одноцепная, на 1 км   | 0,25                                |
| 4.       | Кабельная линия 6, 10 кВ одноцепная, на 1 км   | 0,1                                 |
| 5.       | Две кабельные линии в одной траншее, на 1 км   | 0,05                                |
| 6.       | Воздушная линия 0,4 кВ, на 1 км                | 0,2                                 |
| 7.       | Трансформатор с высшим напряжением 35, 110 кВ  | 0,03                                |
| 8.       | Трансформатор с высшим напряжением 6, 10 кВ    | 0,035                               |
| 9.       | Ячейка выключателя 35, 110 кВ                  | 0,02                                |

## Окончание табл. 1.1

|                |  |                                  |
|----------------|--|----------------------------------|
| 10.            | Ячейка выключателя 35, 110 кВ, внутренней установки                            | 0,015                            |
| 11.            | Ячейка выключателя 35, 110 кВ (в КРУН)   | 0,05                             |
| 12.            | Ячейка отделителя  | 0,05                             |
| 13.            | Ячейка разъединителя 35, 110 кВ  | 0,005                            |
| 14.            | Ячейка разъединителя 6, 10 кВ  | 0,002                            |
| 15.            | Ячейка разъединителя 6, 10 кВ, КРУН  | 0,01                             |
| 16.            | Ячейка предохранителя 6, 10 кВ   | 0,05                             |
| 17.            | Линейный разъединитель 6, 10 кВ  | 0,08                             |
| 18.            | Элегазовый выключатель   | 0,02                             |
| 19.            | Сборные шины 35, 110 кВ  | 0,001                            |
| 20.            | Сборные шины 6, 10 кВ  | 0,001                            |
| 21.            | Короткозамыкатель 35, 110 кВ   | 0,01                             |
| 22.            | Отделитель 35, 110 кВ  | 0,01                             |
| 23.            | Сборка НН-0,4 кВ ТП  | 0,07                             |
| 24.            | Отказ системы контроля изоляции  | 0,05                             |
| 25.            | Отказ первой ступени защиты от однофазного замыкания на землю                  | 0,0368                           |
| 26.            | Отказ второй ступени защиты от однофазного замыкания на землю                  | $3,74 \cdot 10^{-3}$             |
| 27.            | Несрабатывание максимальной токовой защиты при ДЗЗ                             | $3,74 \cdot 10^{-3}$             |
| 28.            | Отказ (отсутствие) блока в РЗ, реагирующего на двойные замыкания на землю      | $7,74 \cdot 10^{-3}$             |
| 29.            | Отказ внешних цепей заземления   | 0,23                             |
| 30.            | Отказ устройства контроля параметров заземления                                | 0,05                             |
| 31.            | Неисправность заземляющих устройств  | 0,2048                           |
| 32.            | Отказ (или отсутствие) системы компенсации токов ОЗЗ                           | 0,01                             |
| 33.            | Автоматический ввод резерва (6, 10 кВ)   | 0,022                            |
| 34.            | Автоматический ввод резерва (35 кВ)  | 0,02                             |
| 35.            | Релейная защита трансформатора (110 кВ)  | 0,01                             |
| 36.            | Дифференциальная защита шина   | 0,0029                           |
| 37.            | УРОВ   | 0,0063                           |
| 38.            | Газовая защита   | 0,003                            |
| 39.            | Максимальная токовая защита  | 0,0006                           |
| 40.            | Автоматическое повторное включение   | 0,0072                           |
| 41.            | Автоматическая частотная разгрузка   | 0,0016                           |
| <b>События</b> |  | <b>Вероятность возникновение</b> |
| 42.            | Прикосновение человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением       | 0,38                             |
| 43.            | Прикосновение человека к металлической нетоковедущей части электрооборудования | 1                                |
| 44.            | Возникновение шаговой напряжении   | 1                                |
| 45.            | Недостаточный уровень изоляции фаз сети на землю (ОЗЗ)                         | 1                                |
| 46.            | Возникновение однофазного замыкания на землю (ОЗЗ)                             | 0,168                            |
| 47.            | Возникновение двойного замыкания на землю (ДЗЗ)                                | $8,82 \cdot 10^{-4}$             |

### 1.3. Факторы, влияющие на надежность и безопасность электрооборудования

Надежность и безопасность обслуживания электрооборудования зависит от множества факторов, в число которых входят время эксплуатации электрооборудования, климатические факторы окружающей среды, человеческий фактор, режимы работы электрооборудования и т.п.

Как показывает анализ литературных источников [91, 120, 136], надежность и безопасность электроустановки, предназначенные для производства, передачи и распределения электрической энергии, всегда находятся под воздействием факторов окружающей среды и условий их эксплуатаций. Согласно [121] факторы, воздействующие на надежность и безопасность, подразделяются на четыре группы:

- окружающая среда;
- эксплуатационные;
- человеческие (случайные);
- ошибки проектирования и монтажа.

Рассматриваем влияние каждого фактора на надежность и безопасность электрооборудования по отдельности.

**Окружающая среда** является одной из существенно влияющих на надежность и безопасность, поскольку функционирование электрооборудования любого вида и назначения зависит от климатических условий (дожди, туман, снег, роса, солнечная радиация, гололедные отложения, интенсивность ветровой и грозовой деятельности, температура и т.п.) местности.

Например, в воздушных линиях электропередачи наиболее из существенно влияющих факторов на их надежность и безопасность считаются гололед, интенсивность дождя, туманность и т.п., а для силовых трансформаторов – солнечная радиация. Также, изменение температуры окружающей среды непосредственно влияет на все механические и диэлектрические характеристики

изоляционных материалов электрооборудования. При этом существенно ухудшается уровень надежности и безопасности электрооборудования.

**Эксплуатационные факторы.** В условиях эксплуатации электрооборудования различного вида и назначения работают в нормальном, аварийном и послеаварийном режиме. Ненормальный режим появляется за счет перегрузок электрооборудования, повреждения в смежных участках и перенапряжения в электрических сетях. Характер возникновения послеаварийных режимов зависит от типа, назначения и загруженности электрических потребителей. Например, в линиях, имеющих потребители двигательного характера, послеаварийный режим за счет самозапуска электродвигателей происходит чаще.

Основными эксплуатационными факторами, влияющими на надежность и безопасность электрооборудования, считают сверхтоки, вызванные КЗ, коммутационные и атмосферные перенапряжения, однофазные замыкания на землю, перегруз электрических аппаратов и т.п.

Для силовых трансформаторов наиболее чувствительными из эксплуатационных факторов являются их перегрузка, механические усилия на обмотках при сквозных токах коротких замыканий. Значительное место в эксплуатационных факторах занимают квалификация персонала и сопутствующие им воздействия (ошибки персонала, некачественный ремонт и обслуживание и т.п.).

Небольшую группу, влияющую на показатели надежности и безопасности электроустановок в эксплуатации, составляют **случайные факторы**: наезд транспорта и сельскохозяйственных машин на опоры, перекрытие на движущийся транспорт под проводами ВЛ, обрыв провода и т.п.

К группе факторов, косвенно влияющих на надежность работы электрооборудования, относятся **ошибки проектирования и монтажа**: несоблюдение руководящих материалов при проектировании, неучет требований надежности и безопасности, неучет величины емкостных токов в

сетях 6–35 кВ и их компенсации при развитии сетей, некачественное изготовление, дефекты монтажа и др.

Согласно [89] одним из элементов, обеспечивающих как надежность электрооборудования, так и принцип построения защиты обслуживающих персоналов, является заземляющее устройство.

Одним из основных параметров ЗУ, характеризующих его состояние, является его сопротивление, которое зависит от факторов окружающей среды и условий эксплуатации электрооборудования. Возрастание сопротивления растеканию тока элементов заземлителей существенно влияет почти на все показатели надежности и безопасности электрооборудования.

На рис. 1.2 приводятся параллельно работающие электрические аппараты, которые имеют электрическое соединение с землей. Рассматриваем влияние сопротивления растеканию тока заземляющих устройств на надежность и безопасность электрооборудования. Необходимо отметить, что ухудшение состояния рабочих заземлений прямо воздействует на режимы работы электрооборудований, т.е. их надежное функционирование зависит от состояния ЗУ.

Например, при возрастании сопротивления растеканию тока ЗУ условия безопасности ухудшаются за счет появления разности потенциалов между электрооборудованием и основанием. В этом случае при прикосновении человека к металлическим нетоковедущим частям электрооборудования он может оказаться под действием электрического тока.

Также, возрастание сопротивления растеканию тока оказывает существенное влияние на процесс разрушения изоляций электрооборудования. В этом случае сокращается долговечность и ухудшается ремонтноПригодность электрооборудования.

Таким образом, ухудшение заземляющих устройств существенно влияет почти на все показатели надежности и условия безопасности электрооборудования.

#### **1.4. Взаимосвязь показателей надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания**

Рассмотрим взаимосвязь надежности и безопасности электрооборудования и их зависимость от состояния элементов заземлителя.

Как отмечается выше, надежностью является «способность электрических аппаратов выполнять заданные функции при сохранении заводских параметров в течение срока годности» [13, 110].

Согласно [37, 51, 64, 84, 99, 120, 140] безопасностью считается «система организационных и технических мероприятий и средств для обеспечения защиты людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества».

Обеспечение надежности необходимо для повышения эффективности функционирования оборудования, уменьшения числа аварийных и ложных отключений, уменьшения временных интервалов ремонтно-профилактических работ и снижения количества повреждений электрооборудования. Также повышение уровня надежности существенно влияет на количество получения травм обслуживающего персонала. Поскольку, улучшение условий безопасности непосредственно зависит от правильности функционирования электрооборудования в различных режимах работы электрических сетей.

При этом ненадежно работающее оборудование может создавать ненормальный режим работы для смежных участков электрических сетей и опасность для обслуживающего персонала.

Как следует из вышеприведенных данных, надежность и безопасность прямо взаимосвязаны между собой, т.е. при понижении уровня надежности электрооборудования соответственно понижается уровень безопасности обслуживающего персонала [9, 120]. Также, при снижении уровня надежности существенно возрастает количество ремонтно-восстановительных и профилактических работ электрооборудования. Взаимосвязь надежности

электрооборудования и безопасности обслуживающего персонала, и влияния ЗУ на их показателей можно представить на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Взаимосвязь надежности электрооборудования и безопасности обслуживающего персонала

Кроме того, снижение уровня надежности и безопасности зависит от поведения микропроцессорных устройств релейной защиты в нормальном, аварийном и послеаварийном режиме электрических сетей.

Заземляющее устройство в не зависимо от типа и назначения всегда считается одним из элементов обеспечивающих, как надежность электрооборудования, так и его безопасное обслуживание [36]. Поскольку, ухудшение состояния элементов ЗУ способствует частным возникновением ненормальных режимов работы электрооборудования.

### **1.5. Заземляющее устройство как элемент, обеспечивающий надежность и безопасность обслуживания электрооборудования**

Как упоминалось выше, в настоящее время для обеспечения надежности электрооборудования и его безопасности обслуживания существуют различные методы и технические средства. Однако, наиболее широко распространённым элементом для повышения надежности электрооборудования и улучшения условий электробезопасности являются ЗУ.

Если надежность функционирования ЗУ не обеспечена, то она влияет на:

- правильность функционирования микропроцессорной системы релейной защиты;

- условия безопасности обслуживающих персоналов;

- повреждения или нарушения отдельных элементов и приборов.

Согласно [9, 89, 138, 139, 8-А, 14-А] одним из элементов, обеспечивающих как надежность электрооборудования, так и принцип построения защиты обслуживающих персоналов, является заземляющее устройство. Ухудшение технического состояния элементов заземляющих устройств непосредственно влияет на снижение уровня надежности и ухудшение условий безопасности [115].

На практике с целью обеспечения надежности и безопасности электрооборудования применяют соответственно рабочее и защитное заземление, устойчивость работы которого зависит от факторов окружающей среды, режимов работы электрооборудований и т.д.

В сетях с глухозаземленной нейтралью напряжением до 1000 В из-за постоянной несимметрии всегда возникают токи нулевых последовательностей, которые замыкаются через нулевой провод. При однофазном и двухфазном коротких замыканиях на землю замкнутая цепь образуется через землю, т.е. через заземлитель.

В сетях с глухозаземленной нейтралью (напряжением 110 кВ и выше) короткое замыкание происходит относительно мало. Однако система оперативного тока таких подстанций имеет непосредственную связь с землей, т.е. через систему заземления постоянно протекают токи нулевых последовательностей.

Как правило, изолированная нейтраль используется в сетях напряжением 6, 10, 20 и 35 кВ, здесь с целью компенсации емкостных токов при однофазном замыкании на землю нейтраль трансформаторов заземляют через большое активное или индуктивное сопротивление. В сетях с изолированной нейтралью вероятность однофазного замыкания на землю всегда больше [25, 63, 114, 118].

Система релейной защиты и автоматики преднамеренно заземляется с целью обеспечения надежности и электробезопасности обслуживающих персоналов. Например, в максимальной токовой защите (МТЗ) с зависимой или с независимой характеристикой выдержки времени, в сетях с изолированной нейтралью применение заземления необходимо с точки зрения электробезопасности. Поскольку МТЗ необходимо для защиты электрических аппаратов от рабочих максимальных и токов внешнего короткого замыкания, т.е. такие защиты реагируют на токи прямой и обратной последовательности [14, 33, 66, 112, 116].

Система заземления в некоторых защитах применяется для обнаружения токов, протекающих через землю. Например, в МТЗ нулевой последовательности защита от однофазного короткого замыкания на землю, защита от однофазного замыкания на землю и т.д., неисправность заземления приводит к ухудшению надежности защиты и их ложному действию, и в некоторых случаях приводит к выходу из строя устройства релейной защиты и автоматики [20, 9-А, 135, 141].

В системе учета и измерения параметров электрических сетей заземление считается основным элементом для обеспечения электробезопасности обслуживающих персоналов и надежности цифровых устройств.

Как отмечается выше, в системе микропроцессорной релейной защиты для обеспечения их надежности (нормального режима работы) и электробезопасности обслуживающих персоналов применяют функциональное заземление. Согласно действующим нормативно-техническим документам [36, 90, 122, 123, 1-А] “функциональным заземлением называется «заземление для обеспечения нормального функционирования аппарата, на корпусе которого по требованию заказчика не должен присутствовать даже малейший электрический потенциал (иногда для этого требуется наличие отдельного электрически независимого заземлителя)»”.

“Функциональное заземление выполняется для того, чтобы обеспечить надежность функционирования электронного устройства в составе другого

оборудования. Шкафы с терминальным оборудованием имеют цифровые информационные каналы, поступающие по разнесенным кабелям в виде гальванически развязанных аналоговых, дискретных и цифровых сигналов. Обычно источники сигналов изолированы от земли и могут иметь произвольные потенциалы, вызывающие возвращаемые по заземляющим проводникам помеховые токи, что существенно влияют на надежность работы цифровых устройств. Для импульсных и высокочастотных помех заметную роль играет индуктивность проводников, создающая негативные условия для взаимовлияния сигналов, искажения их формы и нарушения временных соотношений" [36, 130, 142].

Функциональное заземление выполняется по различной схеме с использованием эквипотенциальных плоскостей и коротких заземляющих проводников с низкой индуктивностью. В шкафах, насыщенных терминальным оборудованием и имеющих цифровые устройства с большими информационными потоками, система функционального заземления должна проектироваться наиболее тщательно, чтобы обеспечить надежность функционирования микропроцессорных устройств и электробезопасность обслуживающих персоналов.

Микропроцессорная техника релейной защиты и автоматики выполняет свою функцию при обработке цифровых сигналов, поступающих на его входы от соответствующих датчиков и первичных измерительных преобразователей. Современные микропроцессорные реле защищают оборудования электрических сетей почти от всех видов ненормальных и аварийных режимов. Также цифровые защиты после обработки сигналов имеют возможность запоминания (осциллографирование электрических величин защищающего объекта) и соответствующих электрических импульсов на систему сигнализации или на отключение.

Основная рабочая функция заземляющих устройств заключается в обеспечении достаточной надежности срабатывания релейной защиты,

проводимости цепи замыкания, находящихся под рабочим напряжением частей электроустановки на заземленный корпус или землю.

Согласно требованиям [33] для обеспечения надежности работы микропроцессорной релейной защиты и автоматики сопротивление функционального заземления нормируется не более 2 Ом.

В тяговых сетях заземление одновременно выполняет функцию защитного и рабочего заземления, а также молниеввода, которое одновременно обеспечивает надежность электрооборудований и электробезопасность обслуживающих персоналов.

Согласно действующим нормативно-техническим документам характеристики заземляющих устройств любого вида и назначения в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах должны соответствовать требованиям электробезопасности персонала обслуживающих электроустановок и обеспечивать следующие эксплуатационные функции:

- надежное действие релейных защит от однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) и короткого замыкания на землю [33, 5-А];
- надежность функционирования микропроцессорных и электромеханических защит от коммутационных и атмосферных перенапряжений;
- отвод токов, возникших в результате несимметрии в фазах электрических сетей;
- защита изоляционных материалов низковольтных оборудований с целью обеспечения надежности и электробезопасности;
- уменьшение влияния электромагнитных воздействий на вторичные цепи;
- выравнивание потенциалов электрооборудования с потенциалом основания;
- защита обслуживающих персоналов и электрооборудования от статического электричества;
- обеспечение взрыво- и пожаробезопасности.

Необходимо отметить, что изменение основных параметров ЗУ, характеризующих ее техническое состояние, непосредственно влияет на надежность электрооборудования и электробезопасность обслуживающих персоналов.

Приведенные эксплуатационные функции заземляющих устройств различного вида и назначения обеспечиваются тогда, когда все ее основные характеристики соответствуют требованиям [20, 36, 46, 47, 50].

Под основными параметрами, характеризующими техническое состояние элементов заземляющих устройств, понимают сопротивление растекания тока заземляющих устройств (для опор воздушных линий, электрооборудования электрических станций и электроустановок подстанций); напряжение прикосновения (для электроустановок напряжением выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью) [53, 65 – 67, 84, 85, 116, 120, 121, 103].

Оценку технического состояния элементов заземляющих устройств осуществляют при определении качества контактного соединения элементов заземлителей, соответствия поперечного сечения заземляющих электрородов требованиям ПУЭ и интенсивности процесса коррозии элементов ЗУ.

Согласно [57, 65, 66, 67] проверку работоспособности ЗУ в электрических установках напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью производят путем проверки пробивных предохранителей, а в электрических установках напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью - петли фаз-нуль.

В настоящее время оценку состояния параметров заземляющих устройств производят следующим образом [55, 56, 75]:

- полная проверка элементов заземлителя и заземляющих проводников – не менее одного раза в течение 12 лет;
- проверка основных параметров в той части, где возможно изменение состояния ЗУ в результате проведенных работ;
- после проведения монтажных работ, переустройства и капитального ремонта оборудования электрических станций и подстанций проводят измерение напряжения прикосновения, но не реже 1 раза в 6 лет;

- проверка пробивных предохранителей и цепи фаз-нуль – не реже 1 раза в 6 лет.

Оценку элементов заземлителей и прилегающих к ним участков рекомендуется производить, когда на территории энергетического объекта происходит короткое замыкание. Также после установки микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики и реконструкции системы защиты, контроля, учёта и т.п. рекомендуется полная проверка состояния элементов заземлителя.

### **1.6. Обзор существующих методов проверки состояния заземляющих устройств**

Как отмечается выше, оценку состояния элементов заземляющих устройств по действующим нормативно-техническим документам производят при выполнении следующих видов работ:

- сбор исходных и паспортных данных и визуальный контроль;
- измерение сопротивления металлоксвязей;
- определение исполнительной схемы ЗУ;
- измерение удельного сопротивления грунта в месте нахождения заземлителя;
- определение сопротивления растеканию тока заземлителей;
- определение напряжения на ЗУ;
- измерение напряжения прикосновения почти во всех электрооборудованиях электрических станций и подстанций;
- определение токораспределения в заземлителях при установившихся токах короткого замыкания;
- определение тепловой устойчивости заземлителей, заземляющих проводников;
- определение распределения импульсных перенапряжений при КЗ на землю и атмосферные и внутренние перенапряжения;

- определение коррозийности вокруг заземляющих проводников и элементов заземлителей.

После проведения вышеуказанных измерений и проверок требуется оформление технического отчета по оценке состояния элементов заземляющих устройств и указание соответствия их параметров требованиям [19, 64].

Для анализа особенности каждого приведённого измерения и проверок рассмотрим методики их проведения по отдельности.

### ***Сбор исходных данных и визуальный контроль***

Необходимыми исходными данными заземляющих устройств электрических станций или подстанций различного вида и назначения для оценки ее состояния являются:

- принципиальная схема первичных соединений электроустановки;
- схема компоновки электроустановки и сведения о существовании проводящих коммуникаций;
- значение токов КЗ в сети с глухозаземленной нейтралью напряжением выше 1000 В;
- значение токов двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В;
- выдержка времени основных и дополнительных защит от токов короткого замыкания, т.е. полное время отключения токов КЗ;
- технический паспорт заземляющего устройства;
- сведения о факторах окружающей среды, температуре, давлении, влажности и т.п.;
- геоэлектрическая схема разреза площадки электроустановок;
- сведения об энергетических объектах.

Исходя из этого осуществляют сбор исходных данных заземляющих устройств электрических станций или подстанций различного вида и назначения.

### *Измерение сопротивления металлосвязей*

Сопротивление металлосвязей элементов заземляющих устройств зависит от качества их присоединения, коррозионных и механических воздействий. Согласно [3, 36, 70-72] это сопротивление не должно превышать 0,05 Ом. Для измерения контактного сопротивления элементов заземлителя применяют метод «вольтметр-амперметра», при котором используется источник питания милливольтметр и миллиамперметр. При этом использование приведённых измерительных приборов по отдельности может привести к существенному возрастанию результата измерения. На рис. 1.3 показана схема подключения измерительного прибора к месту контактного присоединения элементов заземлителя.

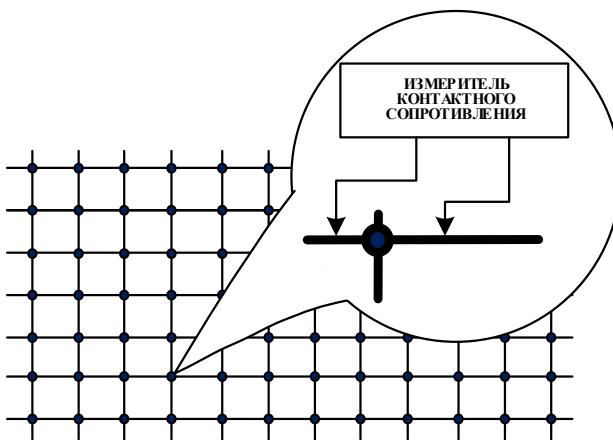


Рисунок 1.3 – Схема подключения измерительного прибора к месту контактного присоединения элементов заземлителя.

Необходимо отметить, что контактные присоединения элементов заземлителя обеспечивают путем сварки и болтовых соединений. Сопротивление контактных соединений в большинстве случаев зависит от условий окружающей среды и от коррозийности присоединения.

Также, существуют различные виды цифровых микроомметров, которые имеют достаточно низкую погрешность.

Также для измерения контактного сопротивления элементов заземляющих устройств можно использовать различные цифровые приборы с необходимым диапазоном измерения [68].

Например, цифровой микромиллиомметр ИКС-1А «Энергетик» имеет подходящие характеристики для определения сопротивления металлоконструкций элементов ЗУ. Измерительный прибор с расширенным функционалом имеет USB выход для подключения к персональному компьютеру или блоку питания. По техническим характеристикам данный прибор имеет допустимую погрешность 0,1%, и диапазон измерения электрического сопротивления составляет 0,001...200 Ом, что идеально подходит для измерения сопротивления контактного соединения между заземляющим проводником и заземляемым аппаратом и другими элементами ЗУ.

### ***Определение исполнительной схемы заземляющего устройства***

Исполнительная схема заземляющего устройства включает в себя схему прокладки искусственных и естественных заземлителей и заземляющие проводники. С целью определения существующей схемы ЗУ составляют рабочий план, на котором показывают компоновку всех элементов энергетического объекта, их металлоконструкций, места заземления нейтралей силовых трансформаторов и т.д. На схеме указываются трассы заземляющих проводников, магистраль заземления и соединительные точки к ЗУ. Трассы заземляющих проводников и заземлители определяют с помощью специальных приборов [65, 66, 67, 4-А, 8-А, 14-А].

Определение трассы исполнительной схемы заземлителей позволяет произвести вскрытие грунта над элементами заземлителей, имитацию токов КЗ на землю и измерение напряжения прикосновения в необходимых точках заземлителей. Поскольку, в существующей исполнительной схеме ЗУ с целью определения коррозионного разрушения элементов заземлителя их точки обязательно указываются.

### ***Измерение удельного сопротивления грунта***

Под удельным сопротивлением грунта понимается один из важных параметров, характеризующих электрическую проводимость грунта, в который

погружены заземляющие электроды. Значение удельного электрического сопротивления грунта необходимо для выбора и расчета заземляющих электродов. Это сопротивление зависит от типа грунта и условий окружающей среды. Необходимо отметить, что удельное электрическое сопротивление грунта зависит от его типа, химико-минерального состава и от других факторов окружающей среды.

Для измерения значения удельного электрического сопротивления грунта существует множество программно-аппаратных средств и методов, с помощью которых можно определить его значение с достаточной низкой погрешностью. Рассмотрим основные характеристики прибора для измерения удельного электрического сопротивления грунта, сопротивление заземлению Chauvin Arnoux C.A 6470N.

С помощью этого прибора можно измерить состояние контуров заземления, удельное электрическое сопротивление грунта и т.д. Измерение производят методом амперметр-вольтметра, при погружении токовых и потенциальных электродов в глубину  $r$  на расстояниях  $d$  друг от друга по нижеприведённой схеме. Значение  $r$  и  $d$  нормируется в зависимости от вида измерения в инструкцию [42].

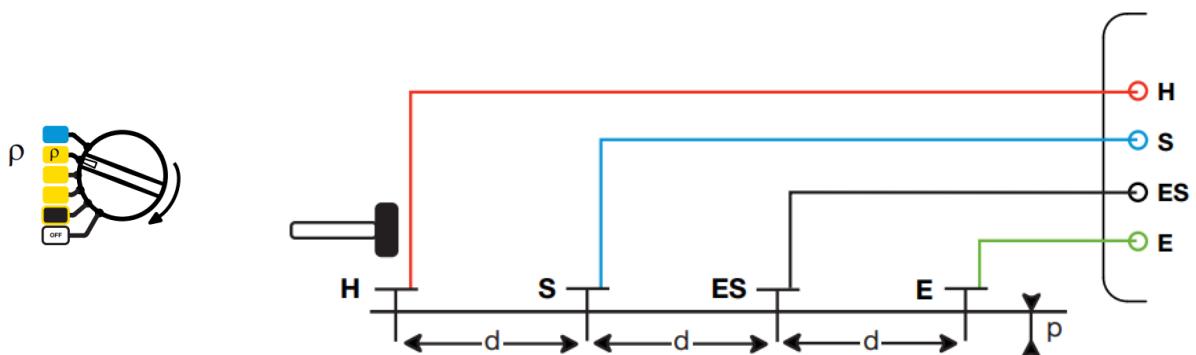


Рисунок 1.4 – Измерение удельного сопротивления грунта  $\rho$   
с помощью С.А 6470N

Следовательно, значение измеренного удельного электрического сопротивления грунта получают по показанию дисплея.

Также, существуют другие виды цифровых приборов для измерения параметров ЗУ, в том числе для измерения удельного электрического

сопротивления грунта. Применение всех измерительных приборов, имеющих низкую погрешность, допускают только при наличии соответствующих сертификатов.

### ***Определение сопротивления растеканию тока заземлителей***

Сопротивление растеканию тока является одним из основных параметров ЗУ, на его значение влияют факторы окружающей среды (влажность грунта, температура, химико-минеральный состав, тип грунта и т.д.), коррозионное состояние элементов заземлителей и т.п. Значение сопротивления заземляющего устройства прямо влияет на условие электробезопасности обслуживающих персоналов, надежность функционирования микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики и другие электрооборудования электроэнергетических объектов различного вида и назначения.

В настоящее время существуют различные методы и приборы для измерения сопротивления систем заземления. Принцип действия всех измерительных устройств основан на методе амперметра-вольтметра. Суть этого метода заключается в пропускании определенного тока через токовые измерительные электроды и измерении падения напряжения посредством потенциальных электродов прибора, которые находятся на определенном расстоянии друг от друга. При измерении ЖК-дисплей прибора показывает отношение напряжения к току, пропускаемого через их измерительные электроды, т.е. сопротивлению. Расстояние измерительных токовых и потенциальных электродов зависит от типа и назначения прибора и нормируется по инструкциям.

Для измерения сопротивления заземляющего устройства можно использовать цифровые приборы С.А 6470N и MRU-200-GPS.

С помощью прибора MRU-200-GPS можно измерить сопротивление металлического элементов заземлителя, сопротивление заземляющих устройств по трех- и четырёхпроводной схеме, сопротивление ЗУ методом двух клещей, удельное электрическое сопротивление грунта методом Ваннера. Большинство

цифровых приборов имеет функцию сохранения результатов измерений в памяти и их подключение через USB к персональным компьютерам. Измерительный многофункциональный прибор MRU-200-GPS имеет функцию системы позиционирования, что позволяет фиксировать места нахождения заземляющего устройства через GPS [44].

### ***Определение напряжения на ЗУ***

Напряжение на заземляющем устройстве определяют как произведение измеренного электрического сопротивления при помощи соответствующих приборов на потенциал повышающего тока, т.е. определяется по закону Ома, т.е.:

$$U_{3У} = R_{3У} \cdot I_{ПП}. \quad (1.9)$$

где  $U_{3У}$  – напряжение на ЗУ;  $R_{3У}$  – сопротивление заземлителей;  $I_{ПП}$  – потенциал повышающего тока.

В качестве потенциала повышающего тока для электроустановки напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью принимается ток ОЗЗ. Для электроустановки напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью не нормируется. В электроустановках напряжением выше 1000 В с изолированной и с глухозаземленной нейтралью принимается соответственно ток двойного замыкания на землю и однофазного короткого замыкания на землю.

На подстанциях, имеющих несколько распределительных устройств (РУ), расчет не проводится для каждого РУ по отдельности. Наиболее расчетное значение принимается как результирующее напряжение на ЗУ [64].

### ***Измерение напряжения прикосновения почти во всех электрооборудованиях электрических станций и подстанций***

Напряжение прикосновения является основным параметром системы заземления, которая учитывается с целью обеспечения электробезопасности обслуживающих персоналов.

Согласно действующим методам значение напряжения прикосновения на электрооборудованиях напряжением 110 кВ и выше определяют при имитации

однофазного КЗ на землю, а на электроустановках напряжением 6, 10, 20, 35 кВ – при имитации двойного замыкания на землю. Минимальная точка для измерения напряжения прикосновения должна быть 5.

Измерение можно произвести с помощью обыкновенных амперметра и вольтметра, которые подключаются к источнику питания через электрооборудование и металлические пластины.

Необходимо отметить, что любое электрооборудование, которое находится под напряжением в независимости от состояния их заземляющих устройств, имеет разность потенциалов с землей.

Эта разность потенциалов зависит от режима работы электрооборудования, состояния их изоляции, контактных соединений заземляющих проводников в корпусах электрооборудования и элементов заземлителя и от других факторов. Как отмечается выше, с целью обеспечения электробезопасности необходимо определить ее значение.

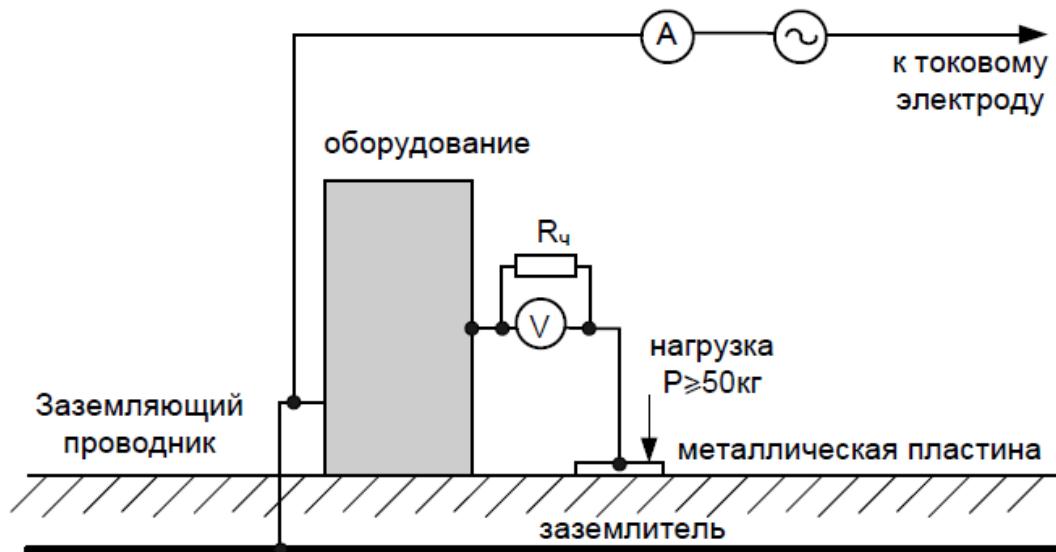


Рисунок 1.5 – Схема измерения напряжения прикосновения

Геометрические размеры металлической пластины и ее механическая нагрузка ( $\geq 50$  кг) нормируются соответствующим нормативно-техническим документом. При этом для имитации сопротивления тела человека используются резисторы с определенным сопротивлением. На рис. 1.5 приводится

принципиальная электрическая схема измерения напряжения прикосновения [26, 27, 35, 102].

Следовательно, для измерения напряжения прикосновения электрооборудования подстанции различного вида и назначения можно использовать современные портативные микропроцессорные приборы.

Прибор MRP-201 является многофункциональным и его характеристики позволяют измерять напряжение прикосновения электрооборудования подстанций [43].

Основными функциями MRP-201 считаются измерение напряжения прикосновения, измерение параметров устройства защитного отключения (УЗО), измерение сопротивления заземляющего устройства и измерение времени отключения УЗО.

### ***Определение токораспределения в заземлителях при установившихся токах короткого замыкания***

Проверка токораспределения в заземляющих устройствах необходима для определения места подключения электрооборудования, на котором ожидается наибольшее значение КЗ к заземлителям. Как известно, такими местами считается группа оборудований, у которых большое сопротивление металлоксвязи, оборудование наиболее удаленное, оборудование, подключенное к заземляющей сетке. Наиболее опасные точки выбираются при имитации КЗ на корпус электрооборудования.

Измерение производят посредством блока питания соответствующих измерительных токовых клещей и вольтметров. Значения токов и напряжений, полученные при измерениях, необходимы для определения токораспределения в заземлителях при установившихся токах короткого замыкания. В материалах [52, 70] приводится методика определения токораспределения в заземлителях.

### **Определение тепловой устойчивости заземлителей, заземляющих проводников**

Определение допустимого тока КЗ для заземлителей и заземляющих проводников по условию тепловой устойчивости осуществляют при учете поперечного сечения заземляющего проводника или экрана кабеля  $S$ , допустимого сечения для тока 1 кА продолжительностью 1с  $S_{\text{доп}}$  и коэффициента, учитывающего продолжительность протекания электрического тока  $q$ .

$$I_{\text{доп}} = \frac{S}{S_{\text{доп}}q} \quad (1.10)$$

где  $S$  – поперечное сечение заземляющего проводника;  $R_{3у}$  – допустимое сечение для тока 1 кА продолжительностью 1с  $S_{\text{доп}}$ ;  $q$  – коэффициент, учитывающий продолжительность протекания электрического тока.

Согласно [85] допустимая температура элементов заземлителя при протекании тока КЗ должна быть не более 400°C. Следует отметить, что тепловое воздействие на элементы заземлителей происходит при КЗ в электрических сетях.

Для определения коэффициента  $q$  используют нижеприведённую формулу:

$$q = \begin{cases} \sqrt{t + 0,09}, & t < 1 \text{ с} \\ 0,8\sqrt{t}, & t > 1 \text{ с} \end{cases} \quad (1.11)$$

где  $t$  – продолжительность протекания электрического тока (в течение 1с)

Для определения температуры медных и алюминиевых экранов контрольных кабелей, систем РЗА при КЗ в электроустановках с глухозаземленной нейтралью напряжением выше 1000 В и для расчета допустимой плотности тока по заземляющему проводнику используют методики, приведенные в [75].

Допустимое значение сечения для тока 1 кА продолжительностью не более 1 секунда  $S_{\text{доп}}$ , приводится в табл. 1.2 для разного типа заземляющего проводника.

Таблица 1.2 – Допустимое сечение заземляющих проводников,  $S_{\text{доп}}$ 

| Тип заземляющего проводника   | $S_{\text{доп}}$<br>$\text{мм}^2/\text{kA}$ |
|---|---|
| Горизонтальный стальной заземлитель                                 | 14,0  |
| Заземляющий проводник из стали, подсоединеный к электрооборудованию | 16,5  |
| Горизонтальный медный заземляющий проводник                         | 4,6   |
| Заземляющий проводник из меди, подсоединеный к электрооборудованию  | 5,4   |
| Арматура железобетона   | 30,3  |

Таким образом, при определении тепловой устойчивости естественных и искусственных заземлителей, заземляющих проводников, применяемых в системе заземления электроэнергетических объектов различного вида, используют различные постоянные коэффициенты для разновидного типа заземляющих проводников [65, 102].

### ***Определение распределения импульсных перенапряжений при КЗ на землю, атмосферных и внутренних перенапряжений***

Импульсное перенапряжение является опасным режимом, который существенно влияет на ускорения старения изоляции, надежность электрооборудований и долговечность элементов ЗУ. Импульсные перенапряжения возникают при коммутации электрических цепей и при неустойчивом КЗ в электрических сетях. Измерение импульсных перенапряжений при коротком замыкании в заземлителях электроэнергетического объекта осуществляют с помощью высокочастотных (ВЧ) генераторов и соответствующих измерительных приборов. При этом импульсные перенапряжения имитируются для режима коммутационного и атмосферного перенапряжения.

Для расчета импульсных перенапряжений при КЗ и атмосферных перенапряжений используют специальные компьютерные программы [64, 102].

## *Определение коррозийности вокруг заземляющих проводников и элементов заземлителей*

Коррозия до сих пор является одним из нерешенных вопросов, связанных с долговечностью и обеспечением минимального сопротивления ЗУ. Для устранения этой проблемы посвящен целый ряд научных трудов, которые предлагают использование специальных видов покрытий для заземляющих электродов. Несмотря на предлагаемые методы обеспечения долговечности и надежности элементов заземлителей, коррозия всегда возникает в проводниках и заземляющих электродах.

Как правило, для оценки степени коррозии элементов заземлителей производят вскрытие грунта в местах:

- заземления нейтралей силовых трансформаторов, разрядников, ограничителей перенапряжения (ОПН);
- в месте нахождения горизонтальных электродов, обеспечивающих металлические связи между заземляющими устройствами ОРУ;
- в местах подсоединения заземляющих проводников, выходящих из зданий к внешнему заземляющему устройству;
- у оборудования, находящегося на периферии открытой части электроустановки.

Количество проверяемых точек должно быть не менее 10, а для открытых электроустановок большой площади может быть увеличено до  $0,1\sqrt{S}$ , где  $S$  - площадь электроустановки в  $\text{м}^2$ .

Коррозия не только ускоряет процесс механического разрушения элементов заземлителей, но и существенно оказывает влияние почти на все электрические характеристики ЗУ, надежность функционирования энергетических объектов любого вида и назначения. Именно коррозия характеризует техническое состояние элементов заземлителей.

Согласно действующим нормативно-техническим документам, коррозионное состояние элементов заземлителей определяют путем вскрытия

грунта над ее элементами. Как указывалось выше, вскрытие грунта производят в определенных точках. Коррозию вокруг заземляющих электродов измеряют с помощью цифровых микрометров и штангенциркулем. Исходя из толщины продуктов коррозии вокруг заземляющих электродов оценивают техническое состояние элементов ЗУ. Этот способ только для оценки коррозийности элементов заземлителей в обязательном порядке требует проведение вскрышных работ, при которых требуется применение специальных инструментов, приборов и большого количества трудовых затрат.

*Метод оценки состояния ЗУ, основанный на косвенных факторах*

Анализ литературных источников показал [4, 23, 24, 3-А, 4-А, 7-А], что на процесс коррозии элементов ЗУ влияют факторы окружающей среды и режим работы электрооборудования электрических станций и подстанций. В работах [1-7, 100, 101, 103, 104, 106, 108, 1-А, 10-А, 11-А] приводятся основные факторы, ускоряющие процесс коррозии элементов заземлителя, в число которых входит следующее:

- влажность грунта;
- тип грунта;
- химико-минеральный состав грунта;
- бактериальный и газовый состав грунта;
- водородный показатель грунта;
- температура грунта;
- удельное электрическое сопротивление грунта;
- наличие токов в заземляющих проводниках заземлителей и т.д.

Приведенные результаты серии экспериментальных исследований [4-А, 8-А, 11-А] факторов, ускоряющих процесс коррозии элементов ЗУ, показывают, что к наиболее существенно влияющим факторам относятся влажность грунта и наличие токов, протекающих через элементы заземлителя. Существуют программно-аппаратные средства для определения коррозионного состояния

элементов ЗУ [17, 23, 71], которые требуют применение дорогостоящих измерительных приборов и трудовых затрат.

Как отмечается выше, для проверки состояния элементов заземлителей существует множество стандартов и нормативно-технических документов. Суть всех действующих методов заключается в оценке состояния заземляющих устройств путём проведения измерения их электрических параметров и визуальных осмотров элементов заземлителя. Дело в том, что визуальный осмотр производят при вскрытии грунта над элементами заземлителя, и при измерении электрических параметров применяются различные виды измерительных дорогостоящих приборов, т.е. для оценки фактического состояния заземляющих устройств требуется большое количество трудовых, финансовых и временных затрат.

В работах [79, 80, 4-А] приводится способ определения коррозионного состояния и изменения сопротивления растеканию тока ЗУ, который разработан на основе теории математического планирования эксперимента. Данный способ предлагает определение коррозионного сопротивления элементов заземлителя и изменение сопротивлению растекания тока в зависимости от двух наиболее существенно влияющих факторов на процесс коррозии (влажность грунта и наличие тока в заземлителях). Согласно этому методу, коррозия оценивается по потере массы металла  $y_1$  при коррозионном разрушении, а сопротивление растеканию тока  $y_2$  – по динамике ее изменения. Математическая закономерность выявляется на основе уравнений регрессий второго порядка [87], при этом определяются регрессионные постоянные коэффициенты и общее выражение математической модели процесса коррозии элементов заземлителей, и изменение сопротивление растеканию тока ЗУ (1.12, 1.13). Основными параметрами данной модели являются  $\chi_1$  и  $\chi_2$  т.е. соответственно значение влажности грунта и токов, протекающих через элементы заземлителя [80].

$$y_1 = 0,1525 - 0,0205\chi_1 - 0,023591\chi_2 + 0,0138\chi_1^2 - 0,083381\chi_2^2 - 0,0568\chi_1\chi_2 \quad (1.12)$$

$$y_2 = 5,932 - 0,76928\chi_1 - 1,01368\chi_2 + 0,3245\chi_1^2 - 2,72325\chi_2^2 - 2,39545\chi_1\chi_2 \quad (1.13)$$

где:  $y_1$  – потери массы металла элементов заземлителей;  $y_2$  – изменение сопротивления растеканию тока ЗУ,  $\chi_1$  – значение влажности грунта в месте нахождения заземлителя,  $\chi_2$  – токи, протекающие по заземляющим проводникам.

Согласно [80, 3-А] при оценке состояния элементов заземлителей по уравнениям (1.11 и 1.12) требуется определить кодированное значение  $X_1$  и  $X_2$ , так как здесь обозначены их физические значения.

Для получения кодированных значений (в зависимости от их физических переменных) необходимо использовать уравнение (1.14).

$$\chi_i = \frac{X_{ih} - X_{i0}}{\lambda_i} \cdot 100 \% \quad (1.14)$$

где  $\chi_i$  – кодированное значение  $i$ -го фактора;

$\chi_{ih}$  – натуральное (физическое) значение  $i$ -го фактора;

$\chi_{i0}$  – нулевое (центральное) значение  $i$ -го фактора;

$\lambda_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора в физическом значении.

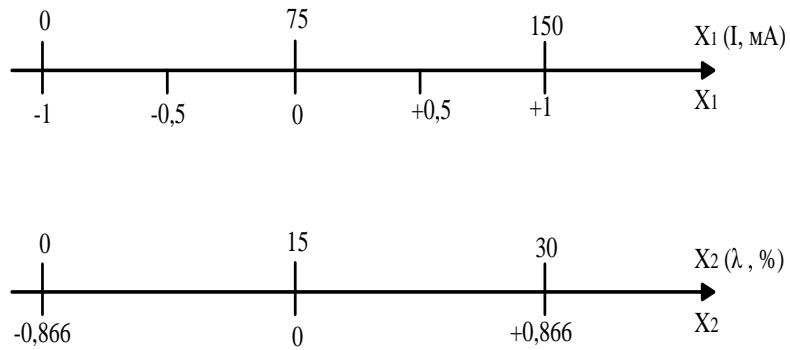


Рисунок 1.6 – Векторное изображение  $\chi_1$  и  $\chi_2$

Также, для определения кодированного значения  $X_1$  и  $X_2$  используют рис. 1.6, на котором приводится шкала изменения интервала варьирования  $i$ -го фактора в физическом и кодовом значениях [80].

Следует отметить, что данная математическая модель разработана на основе полученных данных, которые были исследованы в течение 240 часов. Авторы данного метода на основе (1.12 и 1.13) предлагают математические уравнения для более длительного времени, т.е. находят постоянный «коэффициент времени»  $k_v$ .

$$k_{\text{в1}} = \frac{y_1}{n} \%/\text{сут} \quad (1.15)$$

$$k_{\text{в2}} = \frac{y_2}{n} \%/\text{сут} \quad (1.16)$$

При этом истинное значение годовых потерь массы заземляющих электродов и изменение сопротивления растеканию тока заземлителя получают при произведениях  $k_{\text{в}}$  и продолжительности эксплуатации ЗУ, сут.

$$\Delta m = k_{\text{в1}} \cdot T, \% \quad (1.17)$$

$$\Delta R = k_{\text{в2}} \cdot T, \% \quad (1.18)$$

где:  $\Delta m$  – потери массы металла элементов заземлителей;  $\Delta R$  – изменение сопротивления растеканию тока ЗУ (в течение 240 часов).

Таким образом, проводя постоянное измерение косвенных факторов, т.е. значение влажности грунта и токов, протекающих по заземлителям, оценивают их фактическое состояние без проведения вскрытия грунта.

Как известно, любой действующий метод оценки состояния элементов заземлителя имеет допустимые погрешности, которые зависят от применяемых программно-аппаратных средств, условий окружающей среды и от других факторов.

Следовательно, «Метод оценки состояния ЗУ, основанный на косвенных факторах» имеет допустимую погрешность, которая имеет нелинейную зависимость, т.е. в разные значения влажности грунта получаются разные погрешности при расчете.

На рис. 1.7 методом наименьших квадратов показана зависимость погрешности от влажности грунта.

В работе [108] приводится сравнение результатов экспериментальных и расчетных данных. В табл. 1.3. приводится «Сравнение экспериментальных данных с расчетными».

Как отмечается выше, коррозионное состояние элементов заземлителя согласно методу [13] оценивают по потере массы металла (при коррозии) элементов заземлителя, т.е. у1 уравнение (1.17). Экспериментальные и расчетные данные табл. 1.3 получены в [13, 82, 11-А]. Также, при определении изменения

сопротивления растеканию тока ЗУ проводят по (1.18) и учитывают погрешность (рис.1.7).

Таблица 1.3 – «Сравнение экспериментальных данных с расчетными»

| №<br>п/п | Экспериментальные<br>данные, % | Расчетные данные,<br>% | Погрешность,<br>% |
|----------|--------------------------------|------------------------|-------------------|
| 1.       | 0,1348                         | 0,1451                 | 7,691             |
| 2.       | 0,1369                         | 0,1369                 | 14,77             |
| 3.       | 0,1378                         | 0,1378                 | 18,13             |

Как отмечается выше, коррозионное состояние элементов заземлителя согласно методу [13] оценивают по потере массы металла (при коррозии) элементов заземлителя, т.е. у1 уравнение (1.17). Экспериментальные и расчетные данные табл. 1.3 получены в [13, 82, 11-А]. Также, при определении изменения сопротивления растеканию тока ЗУ проводят по (1.18) и учитывают погрешность (рис.1.7) [80].

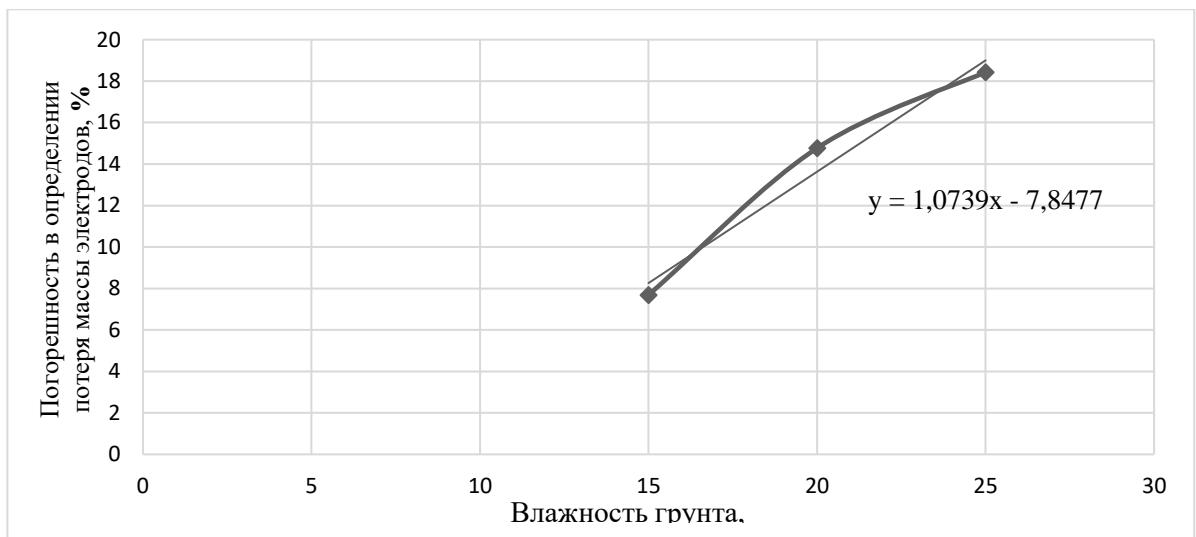


Рисунок 1.7 – Зависимость погрешности от влажности грунта.

В таблице 1.4 приводится «Сравнение экспериментальных данных с расчетными» при оценке изменения сопротивление растеканию тока ЗУ.

Таблица 1.4 – «Сравнение экспериментальных данных с расчетными»

| №<br>п/п | Экспериментальные<br>данные, % | Расчетные данные,<br>% | Погрешность,<br>% |
|----------|--------------------------------|------------------------|-------------------|
| 1.       | 4,197                          | 5,023                  | 16,439            |
| 2.       | 4,899                          | 4,343                  | 11,34             |
| 3.       | 5,895                          | 5,443                  | 7,653             |

Как показывает анализ данных, приведенных в табл. 1.4, результаты, полученные при многократном эксперименте, и расчетные данные [80] отличаются друг от друга, разность которых варьируется от 7,653 % до 16,439%.

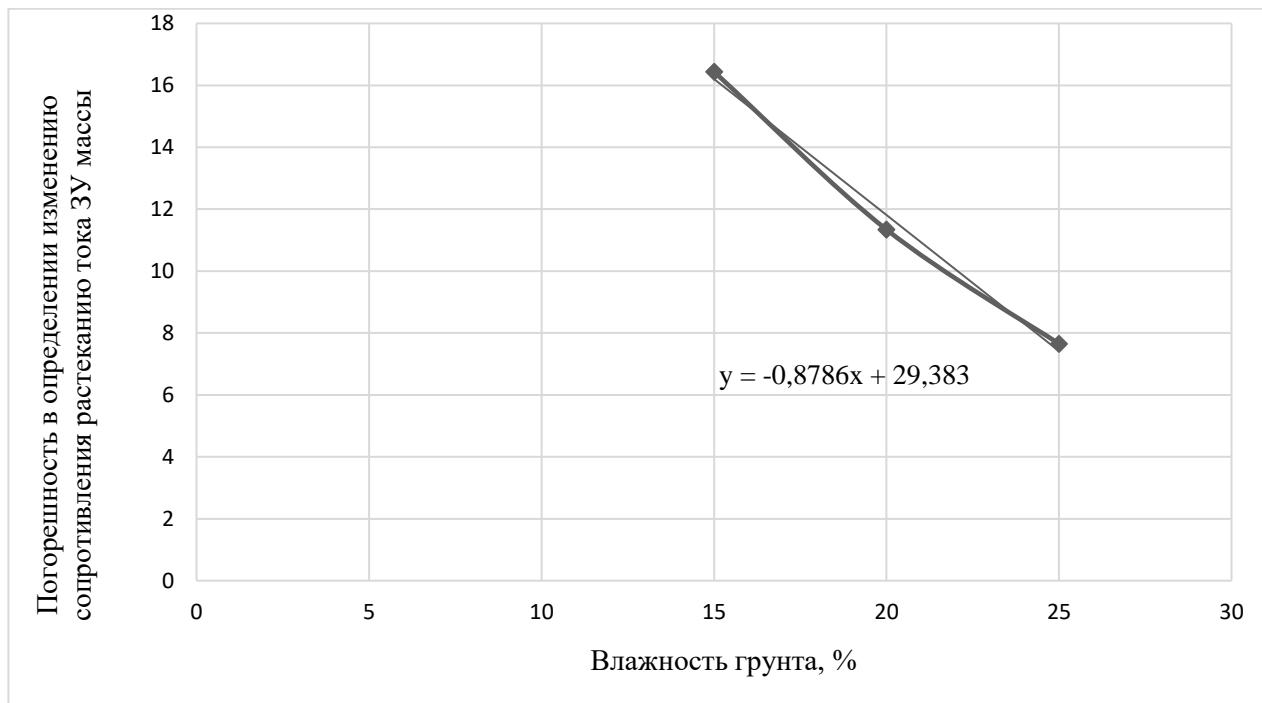


Рисунок 1.8 – Зависимость погрешности от влажности грунта

Как следует из анализа приведенных данных на рисунках 1.7-1.8 и в таблицах 1.3-1.4, при оценке состояния элементов заземлителя погрешность расчетов варьируется от 7,653% до 18,13%.

Кроме того, анализ известных методов показал, что наиболее подходящим для автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования является «Метод оценки состояния ЗУ, основанный на косвенных факторах».

## 1.7. Задачи исследования

Анализ приведённых материалов показывает наиболее удобным методом оценки состояния элементов заземлителя, который не требует применения дорогостоящих измерительных приборов, проведение визуальных осмотров и трудовые затраты, является метод - «Метод оценки состояния ЗУ, основанный на косвенных факторах». Недостаток данного метода заключается в том, что

среднее значение влажности грунта в месте нахождения ЗУ и токов, протекающих по заземлителям, должно определяться при проведении постоянных измерений. Как известно, современные программируемые микроконтроллеры способны постоянно измерять почти любые физические величины и хранить их в виде цифрового кода для дальнейшей обработки.

С этой целью с использованием соответствующих датчиков и программируемых современных микроконтроллеров можно осуществить постоянный автоматический мониторинг влажности грунта и токов, протекающих по элементам заземлителей, и передавать их значение через GSM-сеть на неограниченном расстоянии, т.е. можно осуществить постоянный мониторинг двух выше указывающих параметров.

При этом применение таких современных программируемых микроконтроллеров и соответствующих датчиков позволяет разработать автоматизированную систему оценки надежности и безопасности электрооборудования при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя.

Для разработки автоматизированной системы оценки предполагается выполнить следующие задачи:

1. Анализ факторов, влияющих на надежность электрооборудования и безопасность его обслуживания, и обоснование их взаимосвязи с заземляющими устройствами.
2. Анализ существующих методов оценки показателей надежности и безопасности электрооборудования.
3. Разработка компьютерной и физической модели автоматизированной системы оценки надежности электрооборудований и безопасности его обслуживания.
4. Разработка программного обеспечения автоматизированной системы оценки надежности и безопасности.
5. Оценка надежности электрооборудования и его безопасность обслуживания при применении разработанной автоматизированной системы.

## 2. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ СЕРИИ ATMEL И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

### 2.1. Особенности микроконтроллеров AVR

**Микроконтроллер** – это цифровое устройство, предназначенное для управления, контроля и измерения физических величин электрическими схемами. По сути, микроконтроллер можно называть «электронным мозгом» почти любого цифрового устройства.

Современные микроконтроллеры выполняют на одном кристалле, которые имеют функцию обыкновенного микропроцессора и периферийных устройств. Для обработки и хранения цифровых сигналов микроконтроллеры имеют встроенные оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и постоянное запоминающее устройство (ПЗУ). Все микросхемы семейства Atmel относятся к 8 разрядным видам микроконтроллера, которые отличаются между собой по следующим характеристикам [38, 58, 69]:

- внешняя память, которая варьируется от 8 до 128 кб;
- количество портов, которые варьируются от 20 до 100 пинов;
- количество интерфейсов LIN и CAN контроллеров;
- специальные функции для устройства отображения информации LCD, USB и USB Type-C.

Интерфейс CAN является наиболее распространённой шиной, которая применяется для взаимообмена информации с внешними сетями и в большинстве случаев применяется для автоматизации технологических процессов. При подключении микроконтроллера с внешними сетями посредством шины CAN необходимо ознакомиться с ее характеристиками. Основными условиями подключения интерфейса CAN с внешними сетями является совпадение основных параметров, в число которых входит [38, 39]:

- скорость передачи информации;

- протокол передачи данных на шине (адресация) – необходимо правильно адресовать передаваемые информации на шинах.

Теперь несколько слов о производительности микроконтроллеров. Количество средних операций современных микроконтроллеров составляет 20 миллионов в секунду, что позволяет им выполнять обработку больших объемов информации. Также, применение микросхемы *picоПower* в архитектуре микроконтроллеров обеспечивает низкое их потребление электроэнергии.

При изготовлении микроконтроллеров применяют CMOS-технологии, которые по сравнению с архитектурой RISC считаются наиболее быстродействующими и имеют характеристики низкого энергопотребления. Рассматриваемые микроконтроллеры являются наиболее совершенными семейства AVR-микроконтроллеров.

Как отмечается выше, современные микроконтроллеры AVR семейства Atmel имеют большие возможности и характеристики, которые позволяют автоматизировать любые технологические процессы и измерить физические величины при применении соответствующих датчиков. Отличительными особенностями вышеуказанных микроконтроллеров являются [60, 62, ]:

- FLESH-memory загружаемых программ, объём которых может быть 8...128 кб (количество операций записей и удаление составляет более 1000 раз);
- оперативная память, объем обрабатываемой информации не должен быть более 1...4 кб;
- постоянная память данных на основе EEPROM, который относится к одному из видов энергонезависимой памяти (количество операций записей и удаление составляет более 100000 раз);
- техническая возможность выполнения защиты от чтения памяти программ и цифровых информации;
- техническая возможность самопрограммирования;
- техническая возможность при использовании соответствующих компьютерных интерфейсов;

- техническая возможность подключения микроконтроллера в нескольких режимах низкого потребления электрической энергии;
- техническая возможность внутрисхемного тестирования согласно требованию стандарта IEEE.
- техническая возможность регулирования тактовой частоты встроенных генераторов;
- наличие компонента для снижения напряжения;
- техническая возможность различных видов синхронизации встроенного генератора с внешними сигналами с помощью кварцевых или пьезокерамических резонаторов.

## **2.2. Технические характеристики микропроцессора портов семейства Mega**

Основные технические характеристики микроконтроллеров семейства Mega AVR-микроконтроллеров соответствуют характеристикам программируемых микроконтроллеров Tiny, т.е. они выполняют одни и те же функции. Однако технические возможности Mega позволяют обрабатывать большие объемы цифровых сигналов, хранить их во встроенной памяти и отправлять обработанные сигналы через соответствующие шинки во внешних устройствах. Количество портов микроконтроллеров семейства Mega всегда больше, чем у других видов процессоров. К основным техническим характеристикам микроконтроллеров Mega, Classic и Tiny относятся:

- возможность снижения тактовой частоты до нулевого значения, полная статическая архитектура, которая не имеется во всех программируемых устройствах семейства Mega;
- подключение компонент для выполнения арифметико-логической функции (АЛУ) к общему регистру, назначение которого зависит от типа программируемого устройства;
- возможность с минимальным временем выполнять большинство команд;

- обеспечение многоуровневой системы прерываний.

Приведённые технические возможности программируемых микроконтроллеров относятся ко всем видам AVR-микроконтроллеров. Однако микроконтроллеры семейства Mega имеют ряд преимуществ по сравнению с другими видами программируемых устройств, в число которых входят следующие [12-А, 13-А]:

- большое количество источников прерывания;
- наличие программных стеков, которые в других семействах отсутствуют;
- наличие программно-аппаратной функции умножителя [69].

### **Микроконтроллеры семейства Mega**

Основные технические характеристики портов (ввод/вывод) семейства Mega почти не отличаются от характеристик микроконтроллеров другого семейства. Следует отметить, что назначение большинства пинов (ввод/вывода) микроконтроллера определяют при его программировании, при этом одна «ножка» (вывод) программируемого устройства может быть использована как вход или выход в процессе эксплуатации. Основные характеристики портов микроконтроллера приводятся ниже:

- большинство вывода программируемых микроконтроллеров может быть запрограммировано так, что при эксплуатации использован как вход или выход для электронных сигналов;
- почти на всех выводах имеются буферы с триггером Шмитта;
- простота программного обеспечения и выбора почти любого вывода как «вход» или «выход»;
- наличие возможности подключения резисторов сопротивлением 35...120 кОм в любых выводах микроконтроллера.

### 2.3. Набор периферийных устройств, архитектура ядра и описание портов микроконтроллеров

По сути, периферийными устройствами (ПУ) программируемых микроконтроллеров является их пакет инструментов, который необходим для выполнения той или иной задачи. Именно разнообразие периферийных устройств позволяет микроконтроллеру выполнять наибольшее количество сложных задач. Наибольшее число периферийных устройств имеют микроконтроллеры семейства Mega, которые используются при разработке программного обеспечения. В число периферийных устройств микроконтроллеров AVR входят [38, 61, 65]:

- таймеры/счетчики (8-битные). Эта функция имеется в большинстве типов 8-битных микроконтроллеров. Для более точного функционирования подключают к микроконтроллерам модуль часы и кварцевые резонаторы. Данное периферийное устройство может длительно работать в асинхронном режиме;
- таймеры/счетчики (8-битные), такие устройства имеются в некоторых типах микроконтроллеров;
- контрольный таймер WTD;
- широтно-импульсные модуляторы PWM (ШИМ). Разрядность таких модуляторов составляет 8-битов;
- одно-, двух- и трехканальные генераторы с ШИМ, разрядность которых регулируется в зависимости от технической задачи.

Микроконтроллеры разного типа имеют генератор сигналов с широтно-импульсной модуляцией, разрядность которых варьируется в пределах 8...10 или 1...16 бит;

- периферийное устройство, сравнивающее величины аналоговых сигналов, т.е. аналоговый компаратор;
- аналого-цифровой преобразователь ADC (АЦП). Эти преобразователи относятся к 10-битным устройствам и имеют дифференциальные и

несимметричные выходы. В основном для измерения физических величин применяют данную периферию, которая преобразует аналоговый сигнал в цифровой код [16, 48];

- двойные асинхронные приёмопередатчики (UART), такие периферийные устройства микроконтроллеров семейства Atmega могут быть использованы как приемник, так и передатчик;
- двойные универсальные синхронные и асинхронные приёмопередатчики (UART);
- последовательный периферийный синхронный интерфейс, шина SPI;
- последовательный двухканальный интерфейс TWI, который идеально подходит при разработке устройства для измерения двух вышеприведенных факторов и их обработки.

Из этого следует, что вышеприведённые периферийные устройства микроконтроллеров AVR являются их составной инструментальной частью, которая используется при разработке программного обеспечения.

### *Архитектура ядра микроконтроллеров*

Ядро микроконтроллера является его основной частью, от которого зависит производительность процессоров, разрядность обрабатываемых информаций и т.п. Ядро современных микроконтроллеров семейства Mega выполнено, как и другие семейства AVR-микроконтроллеров на основе RISC архитектуры. Периферийное устройство АЛУ, которое вычисляет цифровые коды, функционирует при последовательной работе рабочими регистрами, вследствие этого, арифметико-логическое устройство выполняет одну операцию за один машинный цикл [22].

Фактически каждый из обработанных кодов при работе микроконтроллера занимает одну ячейку памяти разрабатываемой программы. Во всех микроконтроллерах семейства Mega применяется Гарвардская архитектура, которая позволяет пользователям получить отдельный доступ к собственным шинам. Такая возможность позволяет контроллерам одновременно работать с

памятью программ и с памятью данных. При этом каждые шины могут работать отдельно. Это позволит использовать различные шины для памяти различной разрядности. Также в микроконтроллерах AVR используется технология конвейеризации, которая способствует возрастанию производительности любого цифрового устройства. Далее рассматривается описание портов и характеристики микроконтроллеров AVR различного типа по отдельности.

### **Распиловка и описание выводов микроконтроллеров AVR**

Распиловку выводов микроконтроллеров определяют по инструкциям завода-изготовителя. Каждый вывод имеет определенное назначение, которое необходимо при разработке программного обеспечения и их подключения к электронным устройствам. В настоящее время в семейство Mega входит более 20 видов микроконтроллеров, которые имеют различные функции. Универсальность микроконтроллеров Mega заключается в том, что их вывод одновременно может выполнять несколько операций.

Следовательно, определение назначения параметров и геометрических размеров выводов микроконтроллеров рекомендуется выполнять по соответствующим инструкциям.

При разработке любой электронной схемы геометрические размеры выводов микроконтроллера необходимы для компоновки электронных устройств. Рассмотрим характеристики нескольких микроконтроллеров семейства Mega [69].

### ***Аналого-цифровой преобразователь***

Устройство, которое преобразует аналоговый сигнал в цифровой формат, называется аналого-цифровым преобразователем. Основными параметрами АЦП являются его рабочее напряжение, разрядность цифровых выходных сигналов, частота дискретизации и т.п. В настоящее время существуют различные типы архитектуры АЦП, в число которых входит АЦП параллельного преобразования, АЦП последовательного счета, интегрирующие и Сигма-дельта АЦП [48].

Аналоговые сигналы оценивают по десятичной системе счисления, а дискретные коды (цифровые выходные сигналы) – двоичной системе счисления, т.е. АЦП преобразует десятичный входной сигнал в двоичный код. Аналоговые сигналы имеют большие диапазоны изменения, а цифровые (бинарные) сигналы имеют два значения – 0 или 1.

При преобразовании широкодиапазонных аналоговых сигналов в цифровой формат требуется большие разрядности на выходе АЦП и, таким образом, возможность с низкой погрешностью получить выходные цифровые сигналы. Принцип преобразования аналоговых сигналов в цифровой формат отображается на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Передаточная характеристика 8 разрядной характеристики АЦП

Одним из основных параметров аналого-цифровых преобразователей является их опорное напряжение, которое создается при обработке аналоговых сигналов. В обычных схемах преобразование аналоговых сигналов к цифровому коду производят при помощи соответствующих резисторов и других электронных компонентов.

Как следует из графика (рис. 2.1), аналоговые сигналы изменяются в диапазонах 0...5В, а соответствующие бинарные коды лежат на оси ординат. При 1/5В (анalogовый сигнал) получается цифровой код 001, а при максимальном 5/5 В – 100. Необходимо отметить, что точка отсчета в любой системе счисления начинается с нуля [28].

Таким образом, происходит преобразование аналоговых сигналов в цифровой формат. На практике используют различные 8 разрядные (12, 16, 24 бит) АЦП для получения соответствующих бинарных кодов [48].

Однако в список периферийных устройств микроконтроллера ATmega328 входит 8 разрядный АЦП, который размещен на портах PC0...PC5 (рис. 2.5).

Эта возможность микроконтроллера позволяет разработать устройство для проверки состояния элементов заземлителей без применения дополнительных электронных компонентов и оценивать надежность и безопасность электрооборудования.

#### **2.4. Основные характеристики микроконтроллера типа ATmega**

В настоящее время существуют различные виды программируемых микроконтроллеров [48, 111, 9-А], которые программируются при помощи различных видов языков программирования. Среди них наиболее распространёнными, многофункциональными и удобными для измерения физических величин являются микроконтроллеры типа ATmega.

##### *Микроконтроллер типа ATmega8-16P*

Микроконтроллер выпускается в DIP, TQFP и MLF корпусах (стандартные разновидности корпусов), которые имеют соответственно 28, 32 и 32 выводов. Разрядность данного устройства составляет 8-битов при тактовой частоте 16 МГц. Назначение каждого выводов определяют по нижеприведённой схеме, рис. 2.1. Как показано на рис. 2.1, это устройство состоит из трех портов PB0...PB7, PC0...PC6 и PD0...PD7, выводов AVCC, AREF. Питание ATmega8-16PU осуществляют через выводы VCC (положительный) и GND (отрицательный) источника. Диапазоном рабочего напряжения считается 2,7–5,5 В. Данный тип микроконтроллера работает в активном режиме, режиме ожидания и режиме пониженного энергопотребления, что потребляемый ток составляет соответственно 3,6 мА, 1,0 мА и 0,5 мА [21, 38]. Назначение портов PB, PC и PD зависит от разработки их программного обеспечения и дополнительных функций каждого вывода, которые указаны на рис. 2.2.

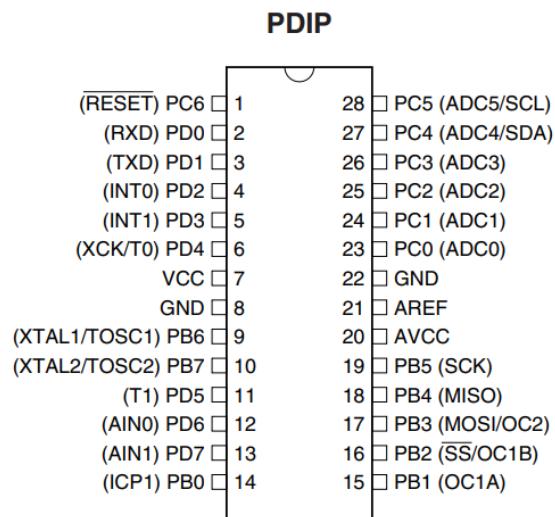


Рисунок 2.2 – Назначение выводов микроконтроллера ATmega8-16PU

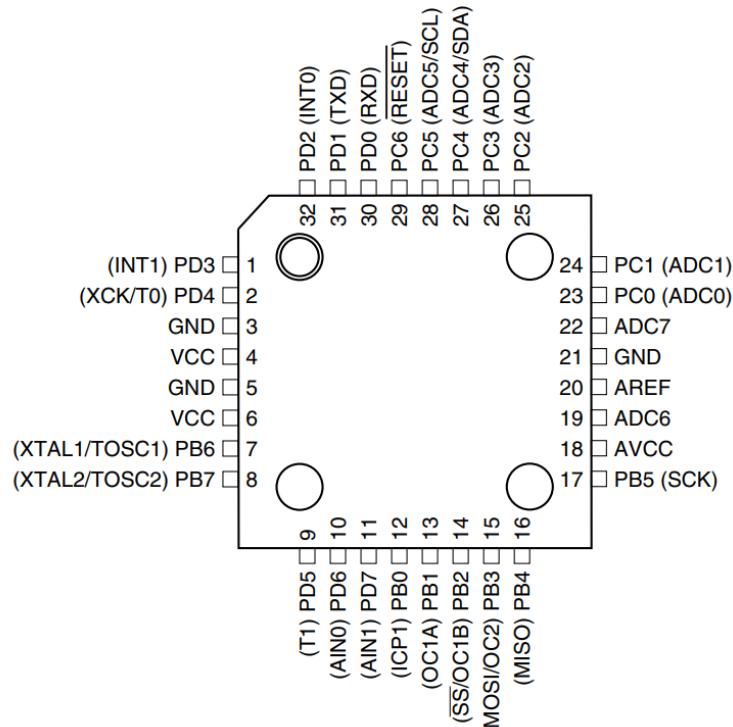
Например, порт PC (выводы 23...28), кроме возможности ввод/вывода, имеет функцию аналого-цифрового преобразователя АЦП, который удобно применять для преобразования полученного аналогового сигнала от соответствующих датчиков к цифровому коду. Для генерации и стабилизации частоты сигналов с определенной частотой предусмотрены выводы XTAL1 и XTAL2 (9...10), к которым подключают кварцевые резонаторы. Программирование микроконтроллера осуществляют через PB3(MOSI), PB4(MISO) PB5(SCK), PC6(RESET), и отрицательный зажим программатора подключают к GND микроконтроллера.

Следовательно, устройство ATmega8-16PU на DIP корпусе удобно применять в физических моделях любого электронного устройства, поскольку в моделях электронных устройств при проведении экспериментальных исследований в большинстве случаев возникает необходимость быстрой замены микроконтроллера. Функция RESET необходима для сброса программ и перезагрузки микроконтроллера.

Рассмотрим технические возможности и назначение выводов микроконтроллера ATmega8-16PU, выполненного на TQFP и MLF корпусах. Архитектура и набор периферийных устройств в нижеприведённых корпусах

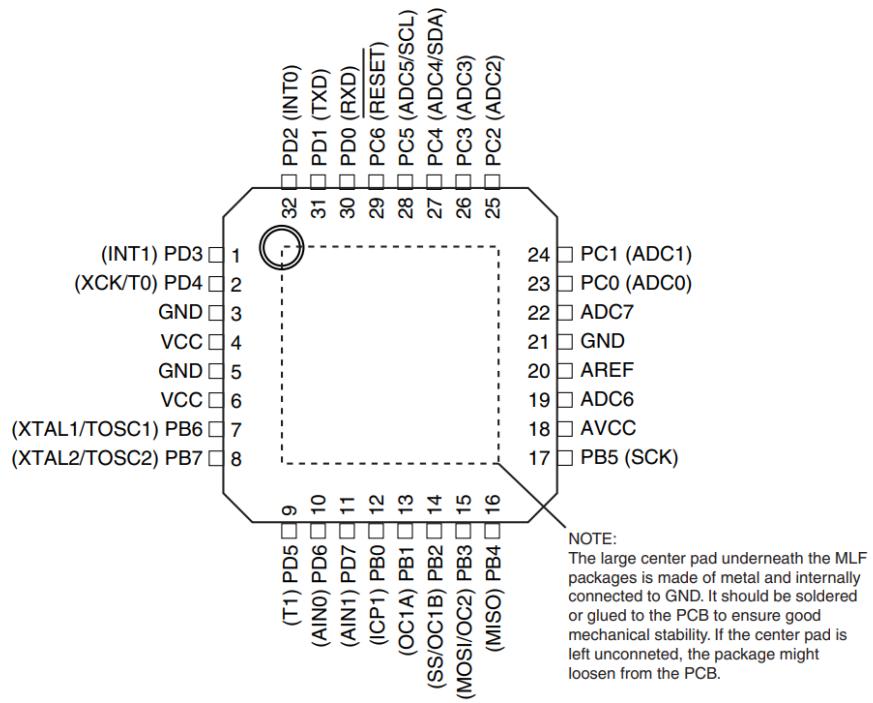
почти не отличаются. Также, основные технические характеристики и количество ввод/выводов в указанных типах однозначны.

### TQFP Top View



a)

### MLF Top View



б)

Рисунок 2.3 – Выводы ATmega8-16PU выполненные на:

a) TQFP; б) MLF корпусах

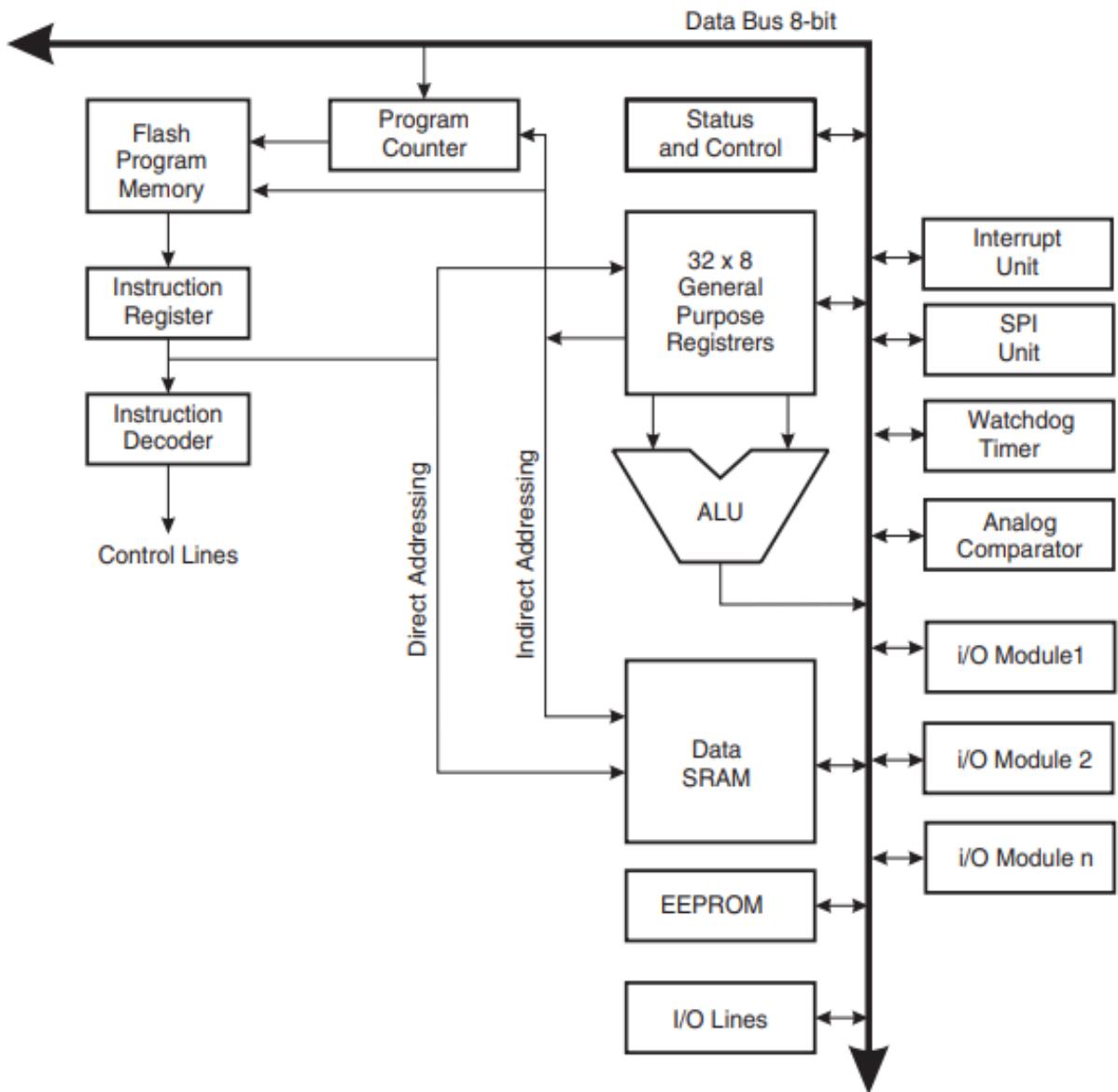


Рисунок 2.4 – Архитектура микроконтроллера ATmega8-16PU

Как показано на рис. 2.4, устройство ATmega8-16PU, выполненное на TQFP и MLF корпусах, состоит из 32-х выводов. Распиловка обоих вариантов соответствует нумерациям и назначениям. Микроконтроллеры имеют порты PB0...PB7, PC0...PC6, PD0...PD7 и выводы VCC (4), GND (3, 5, 21), через которые осуществляют питание. Во всех устройствах Mega программирование осуществляют через выводы SCK, MISO, MOSI, RESET и GND. Последний вывод необходим для выравнивания потенциалов между программатором источника питания программируемого микроконтроллера [38].

Для контроля цифровых сигналов в режиме реального времени в большинстве микроконтроллерах предусматривают ввод для приёма и передачи сигналов, т.е. RXD TXD (30, 31). Рассматриваемые устройства имеют широкие возможности, позволяющие выполнить измерение физических величин, которые поступают в цифровом формате от соответствующих электронных датчиков [109].

Архитектура ядра вышеприведённых микроконтроллеров имеет общую структурную последовательность соединения внутренних компонентов.

### *Микроконтроллер типа ATmega163*

Микроконтроллер выпускается в двух вариантах корпусов DIP, TQFP. Количество выводов этих устройств составляет соответственно 40 и 44 пинов, которые пронумерованы и обозначены буквенными символами. Разрядность данного устройства составляет 8-битов при тактовой частоте 32 МГц. Размещение периферийных устройств и обозначение выводов показаны на рис. 2. a) и б).

Микроконтроллер типа ATmega163 состоит из четырёх портов PA0...PA7, PB0...PB7, PC0...PC7, PD0...PD7, выводов для питания (10-11, 30-31), сброс (RESET, 9) и подключения кварцевых резонаторов (12-13). Идеальным значением напряжения для работы этого устройства считается 4,0...5,5 В. Для преобразования аналоговых сигналов к цифровому коду в обоих вариантах схемы предусматривается АЦП, которые имеют 10 битные разрядности [74, 96].

Как было сказано выше, программирование таких устройств осуществляют через специальные пины, которые в DIP корпусах располагаются в 6, 7, 8, 9 и 11 выводах (рис. 2.4, а), а в микросхемах, выполненных в TQF корпусов программируемых каналов, считаются выводы 1, 2, 3, 4 и 6 (рис. 2.4, б). Для подключения кварцевых резонаторов предусмотрены периферийные устройства, размещенные в 12 и 13 выводах (для DIP корпусов, а в TQF – 7, 8).

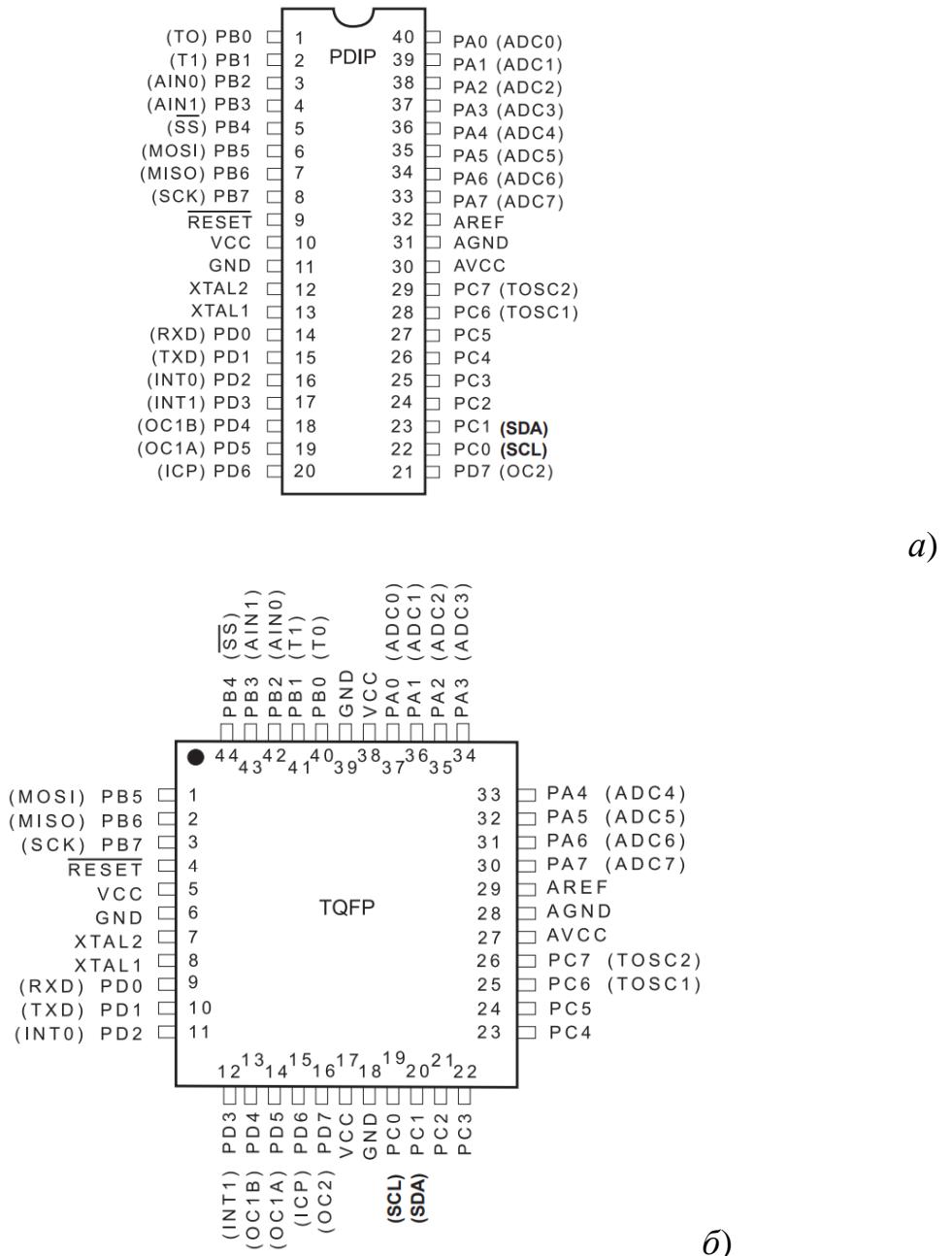


Рисунок 2.5 – Выводы ATmega163, выполненные на:

a) DIP; б) TQFP корпусах

Применение кварцевых резонаторов в микроконтроллерах необходимо для генерации и стабилизации тактовых частот программируемых микроконтроллеров. Эта частота определяет производительность программируемых электронных устройств. Наличие АЦП в обоих вариантах позволяет выполнить измерение любой физической величины через соответствующие датчики. При этом для разработки физической модели имеющих программируемых микроконтроллеров микросхема, выполненная на

DIP корпусах, всегда считается удобной. Поскольку, предварительная схема физической модели всегда разрабатывается на макетной плате и все основные ее элементы связывают посредством многоразовых соединительных проводов, соответствующих резисторов и других электронных компонентов.

Как известно, при проведении экспериментальных исследований в большинстве случаев экспериментатор сталкивается с проблемой выхода из строя электронных деталей. В этом случае замена сгоревших устройств на новые требует проведение миниатюрных работ. При этом замена электронных компонентов, выполненная на основе DIP корпусов, не требует применение дорогостоящих и миниатюрных инструментов.

### *Микроконтроллера типа ATmega328*

Программируемый микроконтроллер ATmega328 является наиболее совершенным электронным устройством, который выпускается в разных типах корпусов. Рассмотрим данное устройство, выполненное на DIP корпусе. На рисунке 2.6 показаны буквенные обозначения и нумерация выводов микроконтроллера, которая состоит из 28 контактов (выводов). Универсальность данного устройства заключается в том, что один его вывод одновременно может выполнять более четырёх функций.

Это устройство состоит из трех портов PB0...PB7 (выводы 14 – 19, 9 – 10), PC0...PC6 (23 – 28, 1), PDO...PD7 (2 – 6, 11 – 13), выводов для питания VCC (7) и GND (8, 22) и других контактов [74].

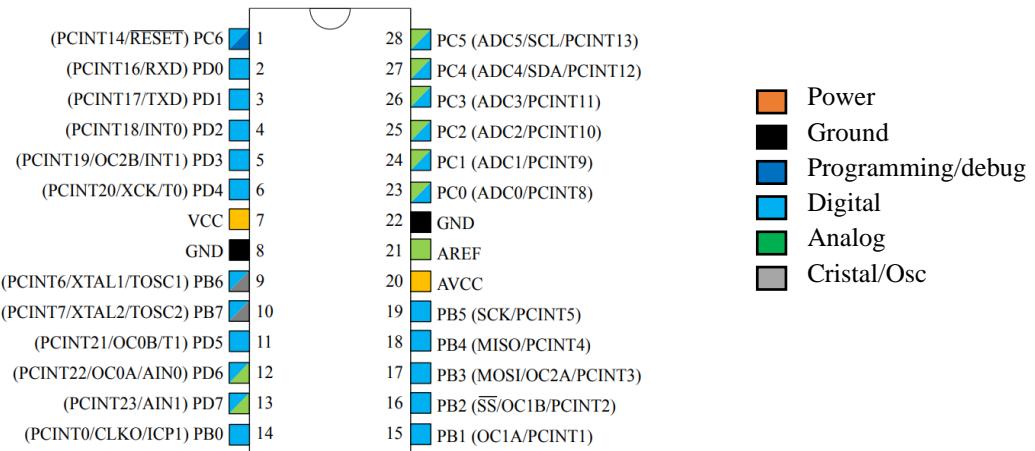


Рисунок 2.6 – Назначение выводов микроконтроллера ATmega328 (DIP)

Как видно из рисунка 2.6, выводы для программного обеспечения расположены в порте PB, которые обозначены MOSI (17), MISO (18), SCK (19). Программирование микроконтроллеров осуществляется при помощи соответствующих программаторов. Для перезагрузки и сброса микроконтроллера функция RESET предусмотрена на выводе PC6. Для постоянного мониторинга любых физических величин вышеуказанные функции Rx и Tx осуществляются через вторую и третью пины.

Наличие аналого-цифрового преобразователя ADC (23-28) позволяет микроконтроллеру осуществить измерение влажности грунта и токов, протекающих по заземлителям через соответствующие датчики.

Наиболее идеальным рабочим напряжением для ATmega328 считается 1,8...5,5В. В качестве источников питания можно использовать выпрямительные блоки питания, аккумуляторные батареи и т.п. Этот микроконтроллер имеет 6 каналов широтно-импульсной модуляции и встроенный аналоговый компаратор, который необходим для сравнения физических величин.

При подключении внешних кварцевых резонаторов тактовая частота ATmega328 достигается до 20 МГц. Энергопотребление данного вида устройства зависит от его режимов работы, которые подразделяются на: активный; режим ожидания и сна, при которых потребление электрического тока соответственно составляет 2,5mA, 0,7mA, 0,1-4 mA.

Как известно, одной из основных характеристик любого электронного устройства является его способность при воздействиях факторов климатических условий, в число которых входят температура окружающей среды, давление воздуха и др.

Рабочим диапазоном температуры для микроконтроллера ATmega328 считается -40...+80°C, при которой микроконтроллер надежно обрабатывает цифровые информации любого объема.

Как следует из анализа приведенных данных в табл. 2.1, микроконтроллеры ATmega8-16PU, ATmega163 и ATmega328 имеют разновидные параметры, например: энергонезависимая FLESH память

ATmega8-16PU составляет 8 Кбайт, а этот показатель в микроконтроллерах ATmega163 и ATmega328 соответственно составляет 16 и 32 Кбайт.

Основные характеристики микроконтроллеров типов ATmega8-16PU, ATmega163 и ATmega328, которые необходимы при разработке физической модели, контролирующей значение влажности грунта и токов, протекающих через элементы заземлителя, приводятся в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Основные параметры микроконтроллеров типа ATmega8-16PU, ATmega163 и ATmega328

| Тип          | Память FLESH, Кбайт | Память EEPROM, байт | Память ОЗУ, байт | Число пинов, шт. | Рабочее напряжение, В | Частота, МГц | Тип корпуса |
|--------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|-----------------------|--------------|-------------|
| ATmega8-16PU | 8                   | 512                 | 1024             | 28               | 2,7...5,5             | 0...8        | DIP         |
|              |                     |                     |                  | 32               | 4,5...5,5             | 0...16       | TQFP, MLF   |
| ATmega163    | 16                  | 512                 | 1024             | 40               | 4,0...5,5             | 0...4        | DIP         |
|              |                     |                     |                  | 44               | 2,7...5,5             | 0...8        | TQFP        |
| ATmega328    | 32                  | 1024                | 2048             | 28               | 1,8...5,5             | 16           | DIP         |
|              |                     |                     |                  | 32               | 2,7...5,5             | 20           | TQFP        |
|              |                     |                     |                  | 32               | 4,5...5,5             | 20           | MLF         |

Память EEPROM в первом и во втором микроконтроллерах одинакова, т.е. 512 байт, а в программируемом микроконтроллере ATmega328 эта память достигает до 1024 байт. Память ОЗУ считается одним из основных параметров любого микропроцессорного устройства, которое составляет 1024 для микроконтроллеров ATmega8-16PU, ATmega163.

Микроконтроллер ATmega328 имеет достаточно большое ОЗУ для выполнения сложнейших технических задач, которое достигает до 2048 байт.

Последовательность работы периферийных устройств ATmega328 приводится в структурной схеме, рис. 2.7.

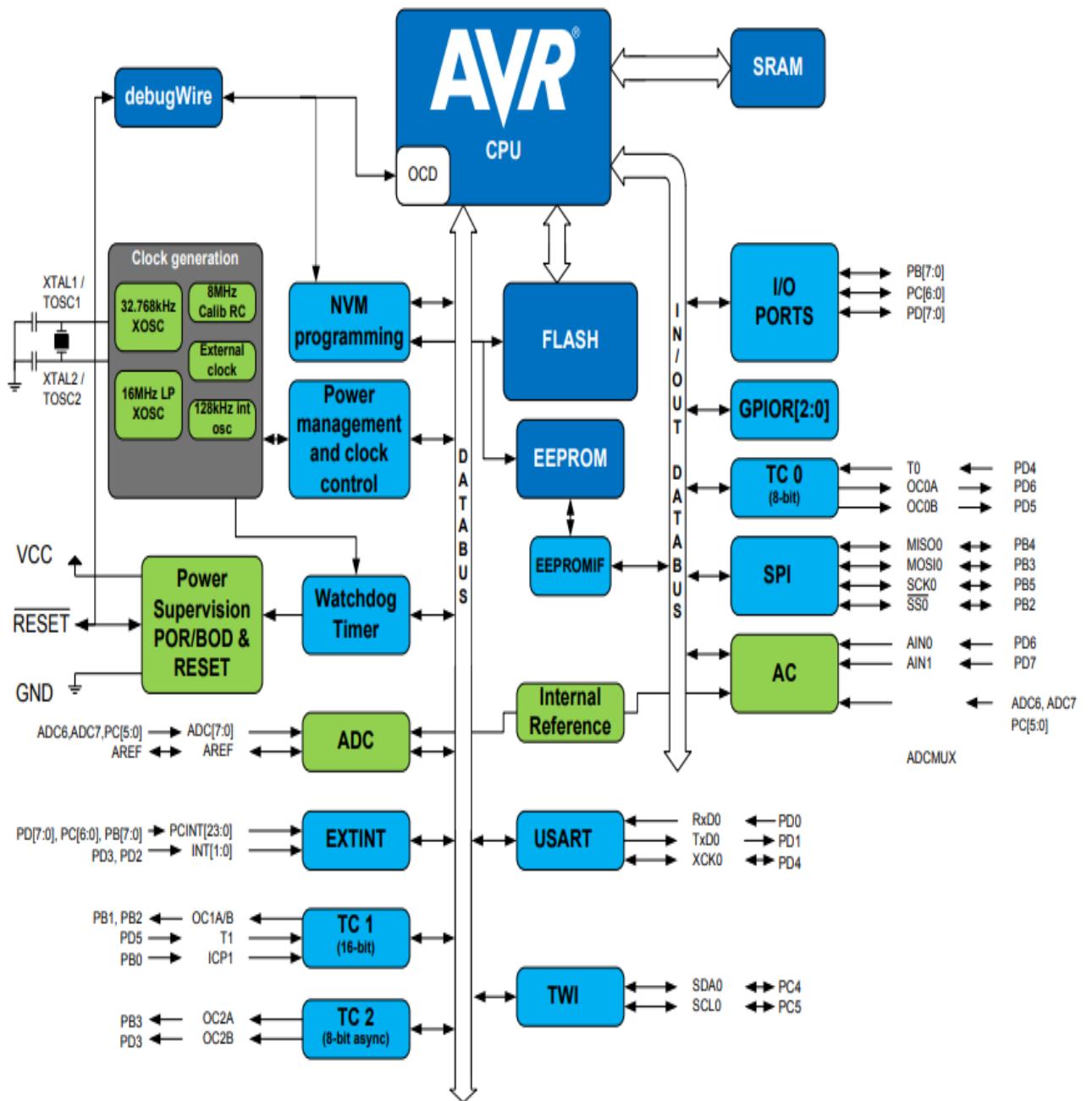


Рисунок 2.7 – Структурная схема микроконтроллера ATmega328

Для расширения производительности в микроконтроллерах ATmega328 используется гарвардская архитектура с отдельными шинами и памятью, при этом всегда обеспечивается надежность выполнения программного обеспечения. На рисунке 2.8 приводится архитектура ядра ATmega328 [60].

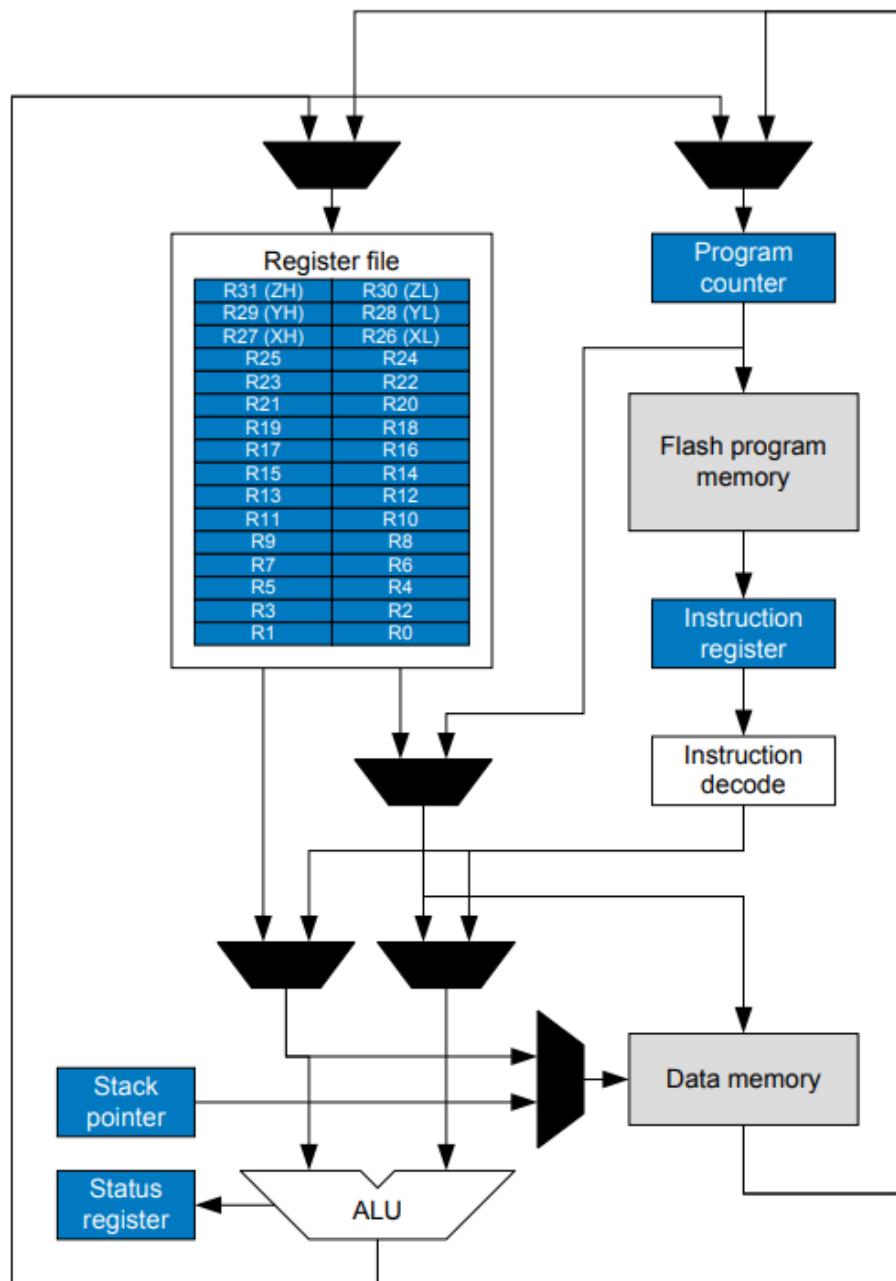


Рисунок 2.8 – Схема архитектуры ядра ATmega328

Назначение основных узлов ATmega328, приведённых на рис. 2.9:

- **register file**- зарегистрированные файлы;
- **program counter**- счетчик команд;
- **flash program memory**- флэш-память программ;
- **instruction register**- регистр команд;
- **instruction decode**- дешифратор команд;
- **data memory**- память для данных;

- **ALU**-арифметико-логическое устройство;
- **stack pointer**-регистр-указатель;
- **status register**-состояние регистра.

Теперь, рассмотрим назначение портов ATmega328, выполненных на TQFP корпусе, который состоит из 32 контактов (выводов).

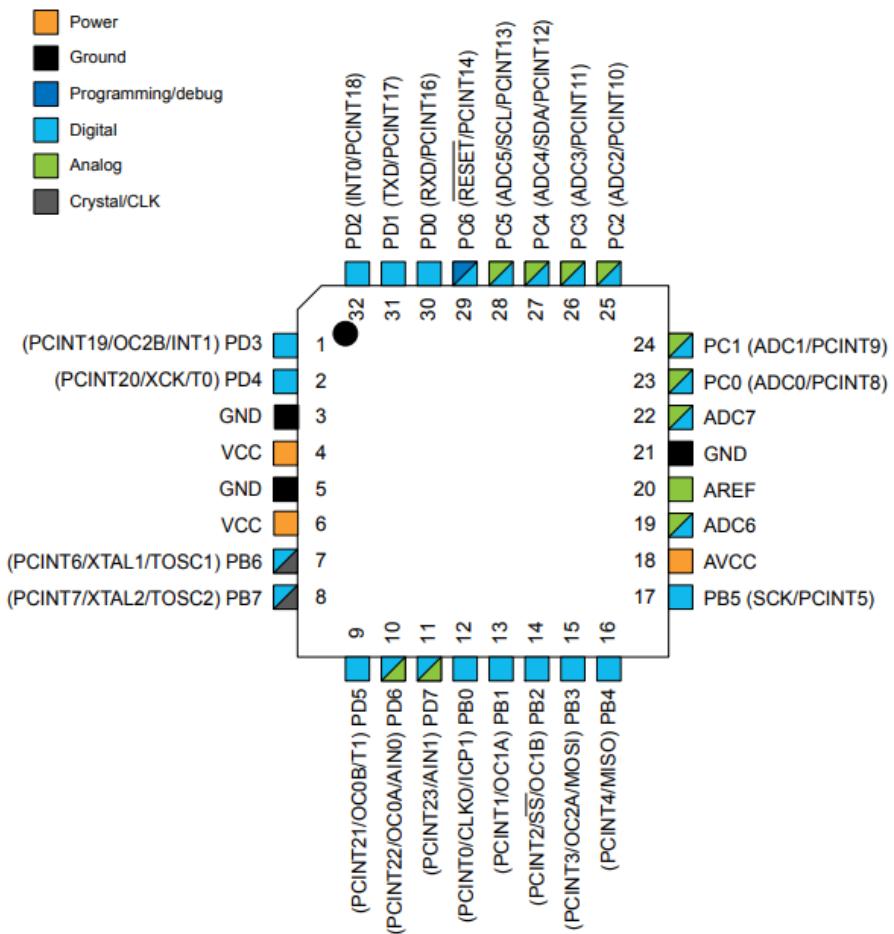


Рисунок 2.9 – Назначение выводов микроконтроллера ATmega328 (TQFP)

Этот вид микроконтроллера имеет три порта (PB, PC, PD), выводы для источника питания (3 – 6, 21) и другие периферийные устройства. Как видно из рисунка 2.9, выводы для программирования (MOSI, MISO, SCK) расположены в порте PB (соответственное расположение в пинах 15-17) [69]. Контроль физических величин в реальном режиме осуществляют через PD0 и PD1 (Rx, Tx). Преобразование аналоговых сигналов к цифровому коду осуществляют через

PC0...PC5, выводы 19 и 22, на которых размещено периферийное стандартное устройство ADC, т.е. аналого-цифровой преобразователь.

Необходимо отметить, что все микроконтроллеры обрабатывают только цифровые сигналы, однако формирование цифровых кодов происходит при преобразовании их аналоговых значений, поскольку изменение большинства физических величин фиксируется в аналоговом виде. При этом микроконтроллер имеет выводы только для цифровых сигналов (выводы 1, 2, 9, 12 – 17, 30 – 32), аналоговых (вывод 20) и для аналого-цифровых сигналов.

## 2.5. Программаторы

Как отмечается выше, программирование всех микроконтроллеров осуществляют при помощи специальных программаторов. По сути, именно программатор считается соединяющим звеном между программируемым микроконтроллером и персональным компьютером, через который обеспечивают программирование микропроцессорных устройств. В этой части работы рассмотрим основные технические характеристики программатора типа USBAsp v.2.0. На рис. 2.10 приводится общий вид программатора типа USBAsp v.2.0, который выполнен на основе микроконтроллера ATmega8A. Этот программатор поддерживает операционные системы Windows XP / 7 / 8 / 8.1 / 10 [69]. Для подключения к ПК используется обычновенный USB вывод. Номинальное напряжение устройства USBAsp v.2.0 составляет 5,0 В, которое совместимо при программировании микроконтроллеров любого типа семейства Mega.

Программатор изготовлен в печатной плате размером 70x18x 10мм, для формирования нужных частот использованы кварцевый резонатор 12 МГц, индикационные светодиоды, резисторы и конденсаторы.



Рисунок 2.10 – Внешний вид программатора USBAsp v.2.0.

Мигание красного светодиода говорит о включённом состоянии устройства, а зеленый индикатор – о процессе обмена данными. Внешняя связь программатора с микроконтроллером обеспечивается посредством IDC разъёмом, который состоит из 10 выводов, и их обозначение соответствует обозначениям выводов микроконтроллера. Как видно из рис. 2.10, программатор состоит из следующих выводов: MISO, SCK, RESET, MOSI, RxD, TxD, GND и VCC.

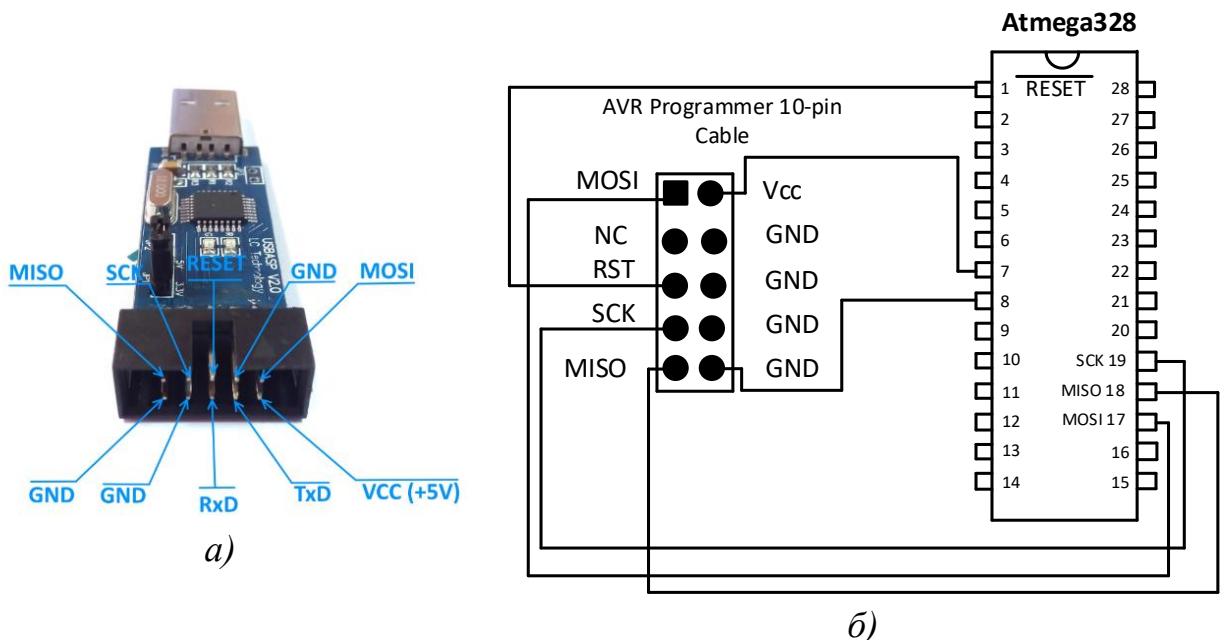


Рисунок 2.11 – Общий вид программатора: *а*) обозначение выводов; *б*) подключение программатора USBAsp v.2.0 к микроконтроллеру ATmega328

При программировании указанные выводы подключают соответственно к выводам микроконтроллера любого типа семейства Mega. Ошибочное соединение выводов программатора и микроконтроллера может привести к выходу из строя программатор или микроконтроллер.

Ниже на рис. 2.12 приводится принципиальная электрическая схема программатора на основе ATmega8A, в котором указана последовательность подключения каждого электронного компонента программатора.

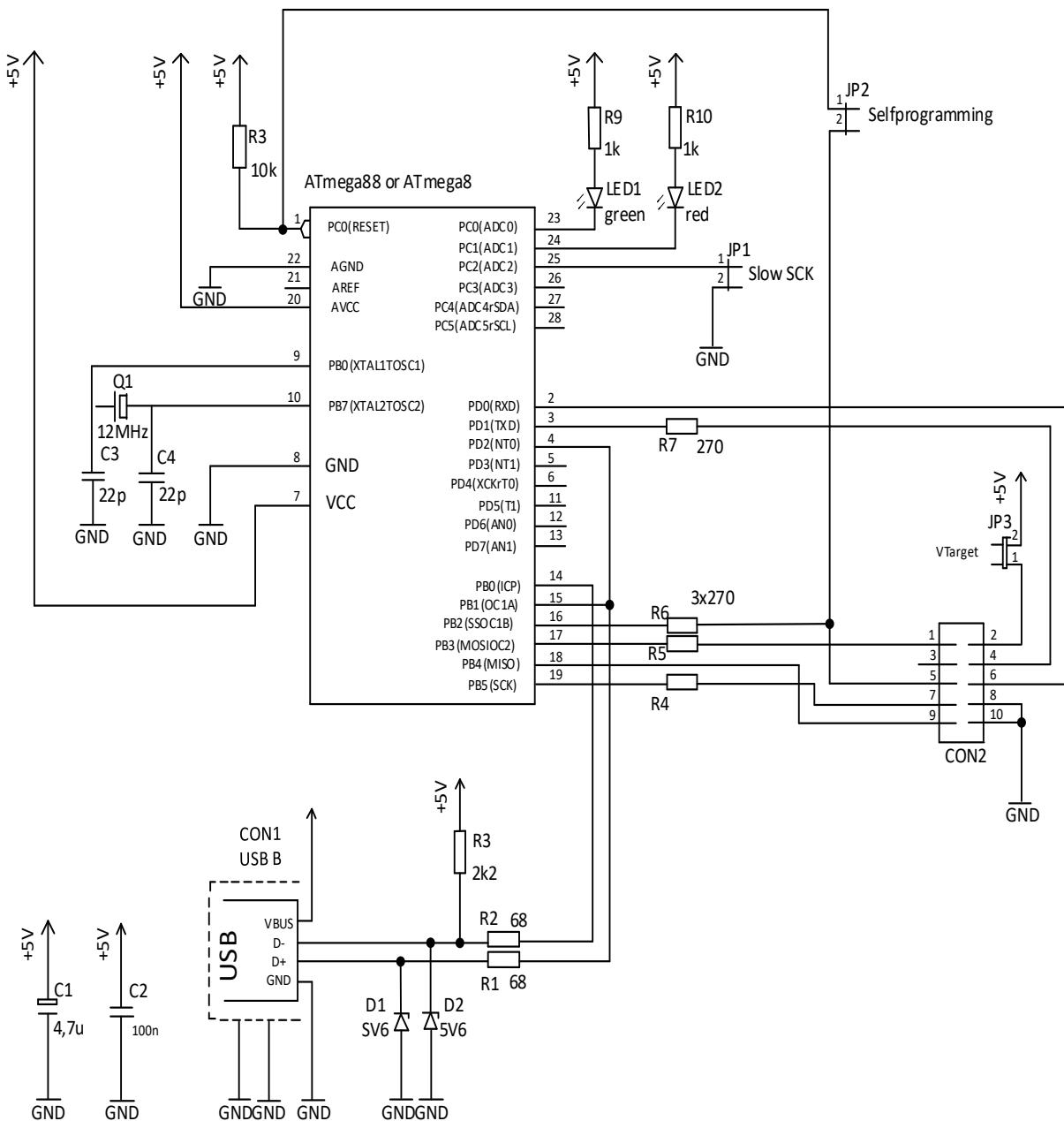


Рисунок 2.12 – Принципиальная электрическая схема USBASP V.2.0.

В схемах программаторов применяют кварцевые резонаторы, конденсаторы, соответствующие резисторы, сигнальные индикаторы, разъемы и другие электронные компоненты.

Применение конденсаторов необходимо для сглаживания и фильтра импульсных помех, поскольку в цифровых устройствах их вероятность появления всегда считается больше, чем в других электронных схемах. Как обычно, в электронных схемах диод применяется с целью выпрямления переменного тока, однако в некоторых устройствах его используют как «обратный клапан», т.е. пропускают входной импульс только в одну сторону.

На рис. 2.12 приводится подключение диодов, применение диода обуславливает пропускание выходных цифровых сигналов только в одну сторону. Также, в некоторых цепях последовательно подключают резисторы, их применение необходимо для предотвращения внутренних перенапряжений. В электронных схемах в качестве ограничителей токов (за счет внутреннего перенапряжения) применяют резисторы.

В цепях, имеющих электронные ключи, разъемы и другие коммутирующие устройства, всегда происходит внутреннее перенапряжение (за счет коммутации), и это напряжение может попасть в порты микроконтроллера. Высокое напряжение всегда приводит к моментальному выходу из строя программируемого микроконтроллера.

Как видно из рис. 2.12, резисторы R1-R7 подключены в цепях разъемов. Некоторые резисторы находятся в цепях источника питания, их применение тоже необходимо для предотвращения внутреннего перенапряжения.

Используя вышеприведённые схемы, на кафедре «Релейная защита и автоматизация энергосистем» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими нами были собраны различные макетные платы, при помощи которых обеспечивали подключение программатора USBAsp v.2.0 к микроконтроллеру ATmega328 [1-A – 12-A].

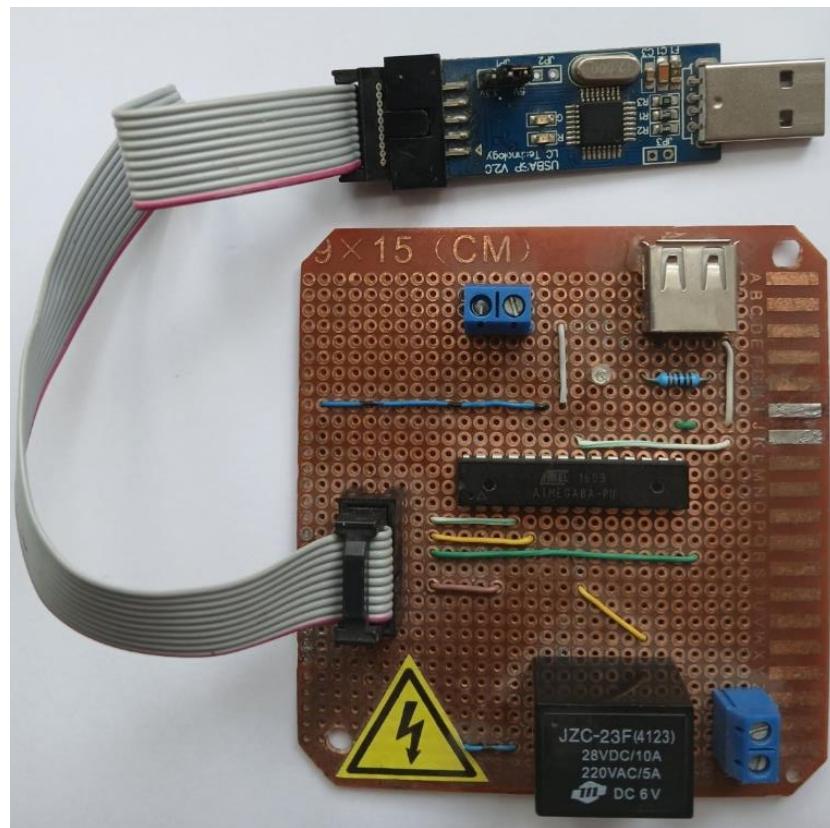


Рисунок 2.13 – Подключение USBAsp V.2.0 к микроконтроллеру ATmega8 на макетной плате

На данной физической модели была проведена проверка работоспособности программатора USBASP V.2.0 и, как видно из рис. 2.13, связь между электронными компонентами, IDC разъёмом и другими элементами обеспечивается за счет соединительных медных проводов. Проверку программно-аппаратного устройства осуществили при помощи компьютерной программы Bascom.

Эта программа предназначена для программирования разнотипных чипов, в том числе AVR-микроконтроллеров. Этот программный пакет поддерживает функцию всех периферийных устройств микроконтроллеров и является одним из самых простых языков программирования. При программировании на платформе Bascom-AVR сначала выбирается тип микроконтроллера, его тактовая частота, назначение всех портов микроконтроллера при помощи специальных алгоритмов.

Как сказано выше, вывод одного порта можно использовать как вход или выход при обработке цифровых сигналов. Это уже зависит от команды при программировании. Например, при введении команд **PIND1 = Output** и **PIND0 = Input** на платформе Bascom-AVR первый и второй вывод микроконтроллера программируется соответственно, как вход и выход для цифровых поступающих сигналов.

В среде Bascom начало программных циклов обеспечивается за счет команды **DO** и конец – **Loop**. Задержка поступающих цифровых входящих или выходящих сигналов осуществляется при помощи стандартной команды **Waitms**. Необходимо отметить, что при программировании выводов микроконтроллера команду ноль или единица задают при использовании десятичной и двоичной системы счисления. В программе задают любые сигналы в десятичной системе счисления, однако этот сигнал должен соответствовать двоичному значению. Например, команда 10111001 в бинарной системе счисления формирует соответствующие компоненты, при этом контроллер должен выполнять какую-нибудь операцию, для этого в программу Bascom-AVR вводят команды 185 (десятичная система счисления).

В настоящее время существует множество видов программаторов для AVR микроконтроллеров, при помощи которых подключают персональный компьютер к электронному устройству. Подключение программаторов обеспечиваются через COM, LPT или USB. Наиболее удобным вариантом являются программаторы, имеющие USB вывод. Существуют MCU, RS-232 и других виды микроконтроллеров. Однако опыт эксплуатации показывает, что для программирования AVR микроконтроллеров программатор USBAsp v.2.0 является надежным и удобным при эксплуатации.

Следует отметить, что программирование микроконтроллеров при учете подключения электронных компонентов и соответствующих датчиков выполняют с помощью специальных алгоритмов.

## 2.6. Датчики влажности грунта

Как отмечается выше, для проверки состояния элементов заземлителей необходимо среднегодовое значение влажности грунта и токов, протекающих по элементам заземлителя. С целью измерения значения влажности грунта рассмотрим технические характеристики существующих цифровых датчиков.

На практике используют резистивные и емкостные датчики влажности грунта. В резистивных датчиках требуется постоянный надежный контакт измерительных электродов, которые погружают в землю.

Резистивные датчики влажности грунта состоят из двух токопроводящих электродов, которые необходимы для измерения содержания влаги грунта. При измерении погружают измерительные электроды датчика в грунт (в месте нахождения заземлителя). Глубина залегания измерительных датчиков нормируется по инструкции прибора [41, 45, 85].

Принцип действия датчиков влажности грунта основан на измерении сопротивления грунта между токопроводящими электродами, которое обратно зависит от значения влажности грунта, т.е. чем выше влажность, тем меньше сопротивление.

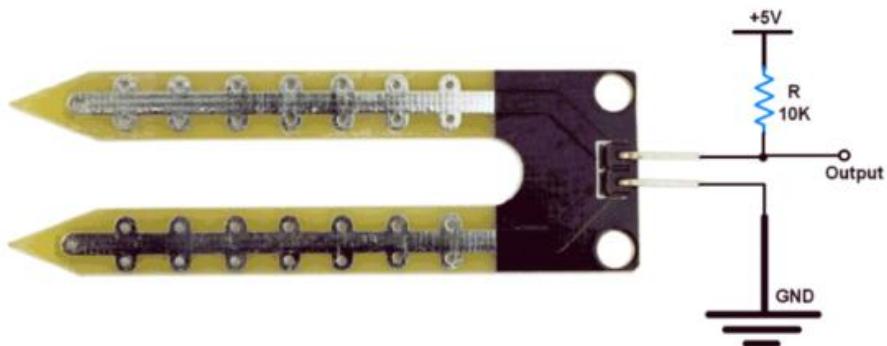


Рисунок 2.14 – Общий вид и схема подключения резистивного датчика

Как следует из схемы подключения датчика, его номинальное напряжение соответствует номинальному напряжению микроконтроллера типа ATmega328.

Вместе с тем, кроме номинального напряжения, требуется соответствие некоторых других параметров.

Необходимо отметить, что измерение любой физической величины осуществляют при многоразовом преобразовании ее с одного вида к другому. В цифровых приборах требуется только дискретные коды. Следовательно, преобразуется аналоговое значение влажности грунта в цифровой сигнал, т.е. единица и ноль. Как отмечается выше, измерительные электроды резистивных датчиков должны всегда иметь надежный контакт с землей.

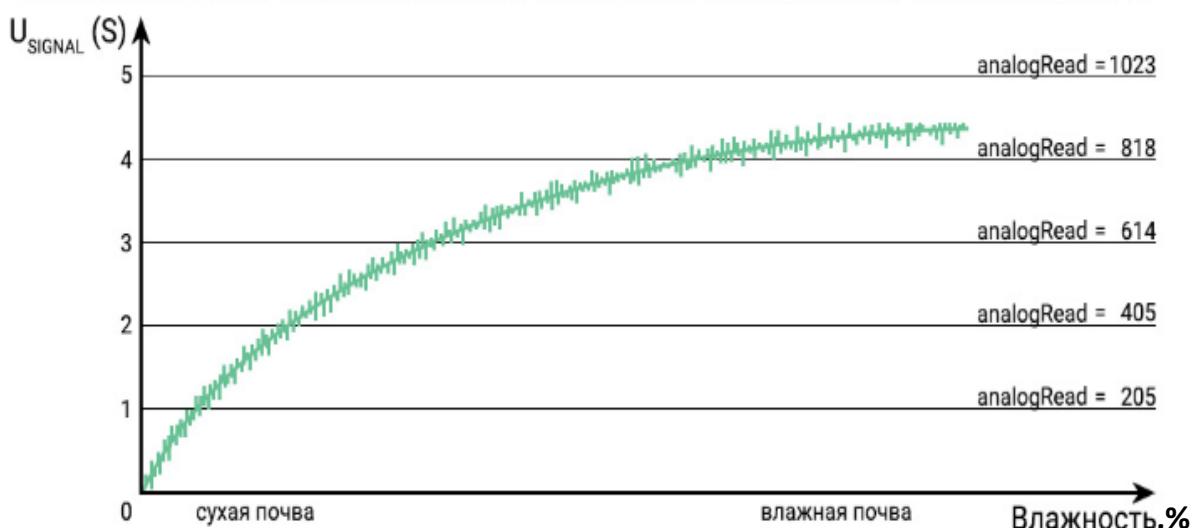


Рисунок 2.15 – Зависимость выходного напряжения датчика от влажности грунта

Как видно из рис. 2.15, напряжение на выходе датчика прямо пропорционально электропроводности грунта. При увлажнении грунта происходит возрастание напряжения на выходе датчика от 0...5В.

При использовании таких датчиков можно легко измерить влажность грунта в месте нахождения заземлителя. Однако здесь возникает проблема, связанная с образованием коррозии вокруг измерительных электродов, из-за этого продолжительность измерения датчика сокращается.

Применение резистивного датчика в устройстве для проверки состояния элементов заземлителя считаем нецелесообразным. Поскольку коррозия

измерительных электродов существенно влияет на погрешность разрабатываемого устройства.

Также, существует емкостный датчик влажности грунта, который состоит из двух измерительных пластинок (электродов), RC-генератора, выполненного на основе LMC555 таймера, и других электронных компонентов. Измерительные электроды выполняют функцию двух обкладок обыкновенного конденсатора. Как известно, обкладки конденсаторов изолированы друг от друга и их ёмкость зависит от прочности изоляции этого диэлектрика и площади алюминиевых обкладок. Необходимо отметить, что при применении резистивных датчиков в подстанциях различного вида и назначения есть возможность столкнуться с различными электрическими помехами, которые могут привести к выходу из строя электронное устройство.

На практике используют различные виды датчиков, которые измеряют любые физические величины. Изменение влажности грунта зависит от его вида и уплотненности, климатических и сезонных факторов.

Также, влажность грунта в разное суточное время изменяется по-разному, для выявления которой необходимо применять датчик влажности грунта.

В емкостных датчиках функцию диэлектрика выполняет грунт, проводимость которого из-за влажности постоянно меняется.

Таким образом, за счет изменения ёмкости двух измерительных электродов происходит изменение напряжения на выводах датчика, которое прямо пропорционально влажности грунта. В отличие от резистивного датчика пластиинки емкостных датчиков имеют специальную пленку и не подвергаются коррозии, т.е. их продолжительность действия больше. Глубина залегания, количество проверок и других эксплуатационных характеристик рекомендуются по инструкции.

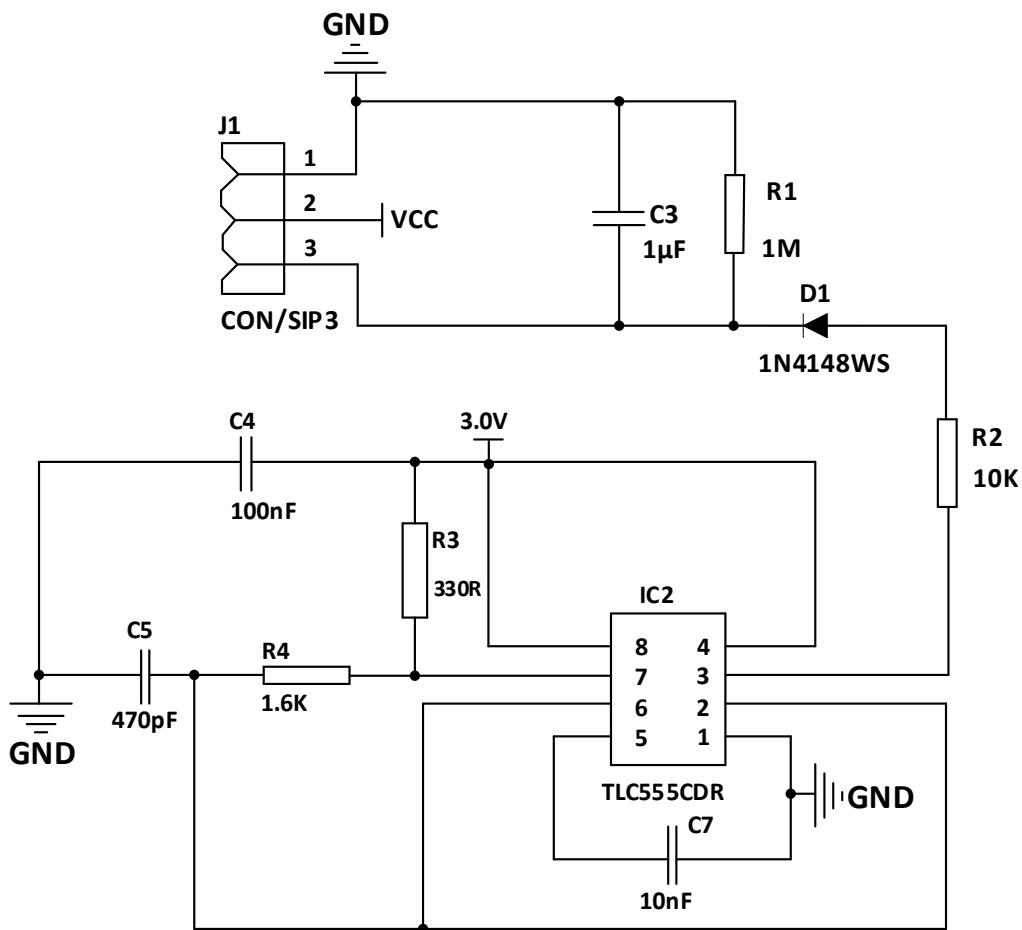


Рисунок 2.16 – Принципиальная схема емкостного датчика типа V2.0

Необходимо отметить, что почти все основные характеристики емкостного датчика влажности грунта типа V2.0 соответствуют характеристикам микроконтроллера типа ATmega328. В том числе его рабочее напряжение составляет 3,3...5,5 В, а потребляемый ток – 5 мА. Наиболее удобным стабильным напряжением для электронных устройств считается напряжение, полученное от аккумуляторных батарей. Выпрямленное напряжение не во всех случаях считается надежным для электронных устройств. Поскольку, в блоках питания при выпрямлении переменного тока не всегда преобразуется идеальный постоянный ток. На практике после выпрямления переменного тока применяют сглаживающие устройства, которые состоят из конденсаторов или катушки индуктивности. При измерении влажности грунта выходное напряжение емкостного датчика варьируется от 0 до 3,0 В.



Рисунок 2.17 – Общий вид емкостного датчика типа V2.0

Теперь для оценки состояния элементов заземлителя рассмотрим возможность датчиков переменного тока, поскольку при проверке состояния элементов заземлителя согласно [41, 6-А] также требуется среднегодовое значение тока, протекающего по элементам заземлителя.

На рис. 2.17 приводится общий вид емкостного датчика типа V2.0 и его соединительные провода. Исходя из вышеприведённой информации, можно сделать вывод, что емкостный датчик типа V2.0 является идеальным вариантом для измерения влажности грунта, поскольку его погрешность и долговечность позволяет разработать устройство для проверки состояния элементов заземлителя.

## 2.7. Датчик переменного тока

Как известно, с целью измерения значения тока на практике используют различные измерительные преобразователи, которые широко применяются в системе РЗА, цепей учета и измерения и т.п. В цифровых техниках требуются более низкие и помехозащищённые измерительные преобразователи. Трансформаторный преобразователь (датчик) тока типа ZMCT103С является

наиболее распространённым, который имеет идеальные характеристики для подключения с микроконтроллером типа ATmega328 [88, 137].

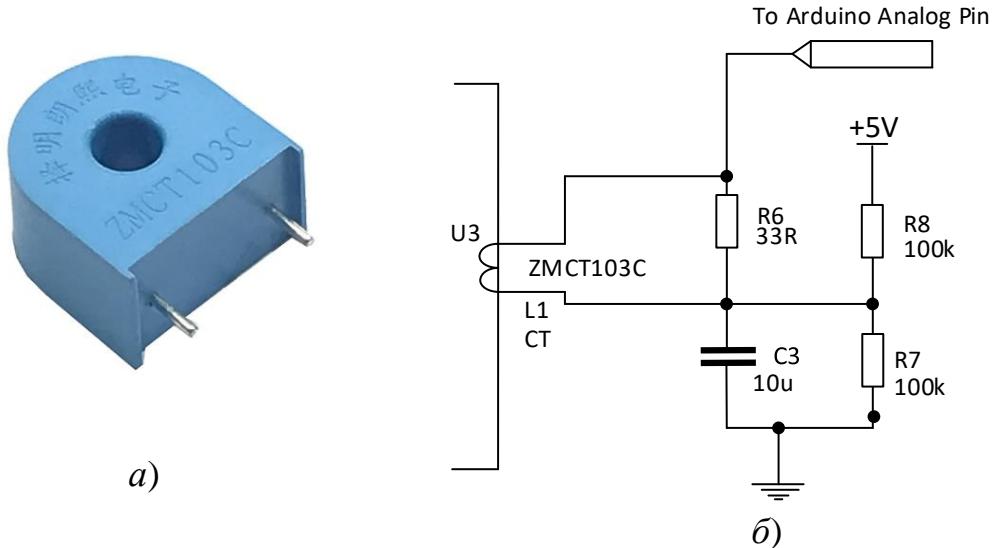


Рисунок 2.18 – Датчик переменного тока ZMTC103C, *а*) общий вид, *б*) принципиальная электрическая схема

На рис. 2.18 приводится общий вид *а*) и принципиальная электрическая схема датчика переменного тока ZMTC103C.

Как видно из рис. 2.18 *б*) датчик переменного тока типа ZMTC103C имеет три резистора (R1, R2 и R3) и один конденсатор емкостью 10 мкФ. С выходом этого датчика всегда выходят аналоговые сигналы. Следовательно, применение резисторов необходимо для создания потери напряжения, а конденсатор сглаживает выходной сигнал от помех.

Приводим основные характеристики вышеуказанного датчика [88, 112]:

- номинальный вторичный ток, 1 А;
- коэффициент трансформации, 1000/1;
- напряжение изоляции корпуса, 3000 В;
- погрешность датчика, 0,2%;
- выходной ток, 5 мА.

Следовательно, применение ZMTC103C считаем целесообразным при разработке устройства для проверки состояния элементов заземлителя.

Необходимо отметить, что указанные датчики для измерения влажности грунта V2.0 и датчик переменного тока ZMTC103C генерируют аналоговые сигналы на своих выходах, а микропроцессорная техника, в том числе микроконтроллеры обрабатывают сигналы в цифровом формате. С этой целью производится преобразование аналоговых сигналов к цифровому виду. Устройство, которое преобразует аналоговый сигнал в цифровой код, называют аналогово-цифровым преобразователем (АЦП).

## 2.8. GSM-модуль

В современном мире без применения GSM-сети обеспечение мобильного сигнала и интернета невозможно. В этой сети основным элементом воспринимающих цифровых сигналов является GSM-модуль, который является встроенным элементом смартфонов, контроллеров, умных домов и промышленных программируемых контроллеров.

Одним из основных элементов GSM-модуля является SIM-карта телекоммуникационного оператора. Этот элемент является электронным идентификатором модуля отдельного абонента, который имеет встроенный процессор, энергонезависимую память ПЗУ и другие цифровые элементы.

В настоящее время GSM-технология является наиболее распространённой беспроводной сетью, которая охватывает сеть связи, навигации, высокоскоростного интернета и других телекоммуникационных систем. Также, эта технология применяется в электрических сетях с целью обеспечения дистанционного контроля, управления и измерения электрических параметров.

В современных микропроцессорных релейных защитах применяют GSM-модули, которые необходимы для обеспечения селективного действия последовательных защит, передачи их параметров на дальние неограниченные расстояния.

Как известно, в последнее десятилетие развивается технология Smart Grid (умная сеть). Для реализации этой технологии требуется передача цифровых

сигналов на дальние расстояния и их обработка при помощи соответствующих процессоров. При передаче цифровых сигналов применяют оптико-волоконные кабельные сети и GSM-технологии. Как отмечается выше, GSM-модуль считается приемником и передатчиком цифровых сигналов.

Для анализа технических возможностей GSM-модуля ниже рассмотрим электронные компоненты, основные параметры и общий вид GSM-модуля типа SIM800C.

Основные характеристики GSM-модуля типа SIM800C почти полностью соответствуют параметрам микроконтроллера ATmega328. Номинальное напряжение SIM800C составляет 3,7...4,2 В [10, 11, 15, 18, 40, 62, 92, 107, 109, 117]. Как видно из приведенных данных, рабочее напряжение цифровых устройств варьируется в определенных диапазонах. Это связано с тем, что при обработке цифровых сигналов объем информации в микроконтроллере всегда изменяется, и эта приводит к изменению потребляемого тока.

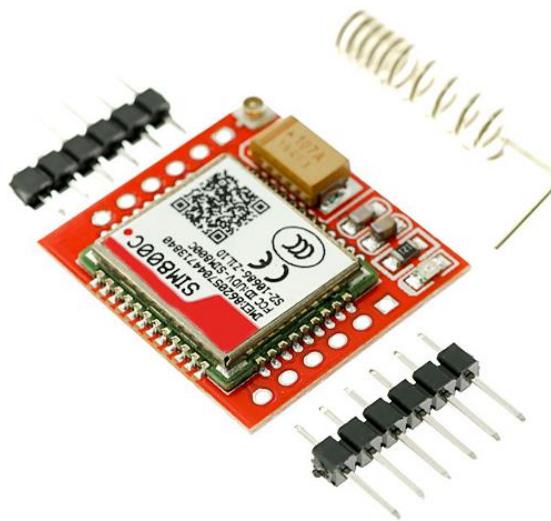


Рисунок 2.19– Общий вид GSM-модуль SIM800C

Как известно, при изменении потребляемого тока в электрических схемах происходит изменение других электрических параметров, в том числе напряжение этой электрической цепи. Следовательно, производители электронных компонентов изготавливают микроконтроллеры для определенного диапазона рабочего напряжения.

Применение GSM-модуля типа SIM800C в устройстве для проверки состояния элементов заземлителя необходимо для непрерывной передачи значения влажности грунта и токов, протекающих по заземлителям, на мобильном устройстве по SMS-сообщению.

## 2.9. Выводы

Анализ технических возможностей электронных компонентов показывает, что характеристики микроконтроллеров, датчиков влажности грунта, датчика переменного тока, аналого-цифровых преобразователей, GSM-модулей и других электронных устройств имеют широкие технические возможности.

1. Датчики влажности грунта типа V2.0 имеют большой диапазон измерения, легко подключаются к электронным компонентам и все его характеристики соответствуют параметрам микроконтроллера ATmega328.

2. Для измерения значения тока, протекающего по элементам заземлителя, рассматривались характеристики датчика переменного тока ZMTC103C, который имеет подходящие выходные сигналы для вышеуказанного микроконтроллера.

3. Для дистанционного наблюдения за параметрами заземлителя проанализировали параметры GSM-модуля типа SIM800C, который был признан целесообразным для передачи любого объема цифровых сигналов по GSM-сетям.

Как следует из вышеприведенных информаций, характеристики цифровых компонентов позволяют разработать автоматизированную систему оценки надежности и безопасности обслуживания электрооборудования при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя.

### **3. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЕГО БЕЗОПАСНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ**

#### **3.1. Общие сведения**

Как было сказано выше, в рамках данной работы оценка надежности и безопасности обслуживания электрооборудования рассматривается при постоянном мониторинге состояния заземляющих устройств. В настоящее время существует целый ряд дорогостоящих приборов и методов для проверки состояния элементов заземлителя, которые при применении требуют большого количества трудовых, временных и финансовых затрат. С целью сокращения количества приборов рассмотрим возможность разработки автоматизированной системы оценки надежности при мониторинге состояния элементов заземлителя методом, основанном на косвенных факторах [79, 80, 3-А, 4-А, 6-А].

Как следует из вышеприведенного анализа электронных компонентов, технические характеристики микроконтроллеров, датчиков влажности грунта, датчика переменного тока и GSM-модуля позволяют разработать автоматизированную систему на основе микроконтроллера типа ATmega328. Это устройство может одновременно измерять значение влажности грунта и токов, протекающих по заземлителям, поскольку согласно [4-А] для проверки состояния элементов заземлителя требуется среднегодовое значение вышеуказанных параметров. Также, для осуществления дистанционного измерения необходимо рассматривать применение GSM-модуля в разрабатываемой системе.

Следовательно, применение программируемого микроконтроллера ATmega328 позволяет разработать автоматизированную систему оценки надежности и безопасности при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя, не требующее проведения вскрытия грунта над элементами ЗУ и использования дорогостоящих приборов. Современные микроконтроллеры

имеют широкие технические возможности, которые позволяют решать почти любые технические задачи.

Для этого необходимо разработать принципиальную электрическую схему, структурную схему и физическую модель устройства для проверки состояния элементов заземлителя.

### 3.2. Разработка принципиальной электрической схемы автоматизированной системы оценки надежности электрооборудования и его безопасности обслуживания

Как известно, принципиальные электрические схемы отражают непосредственную электрическую связь электронных компонентов, последовательность их работ и принцип действия. Эта схема должна обеспечивать надежность, безопасность, удобство эксплуатации и обслуживания, и экономичность разрабатываемого устройства, поскольку принципиальные электрические схемы всегда считают основанием для разработки функциональных, структурных и монтажных схем.

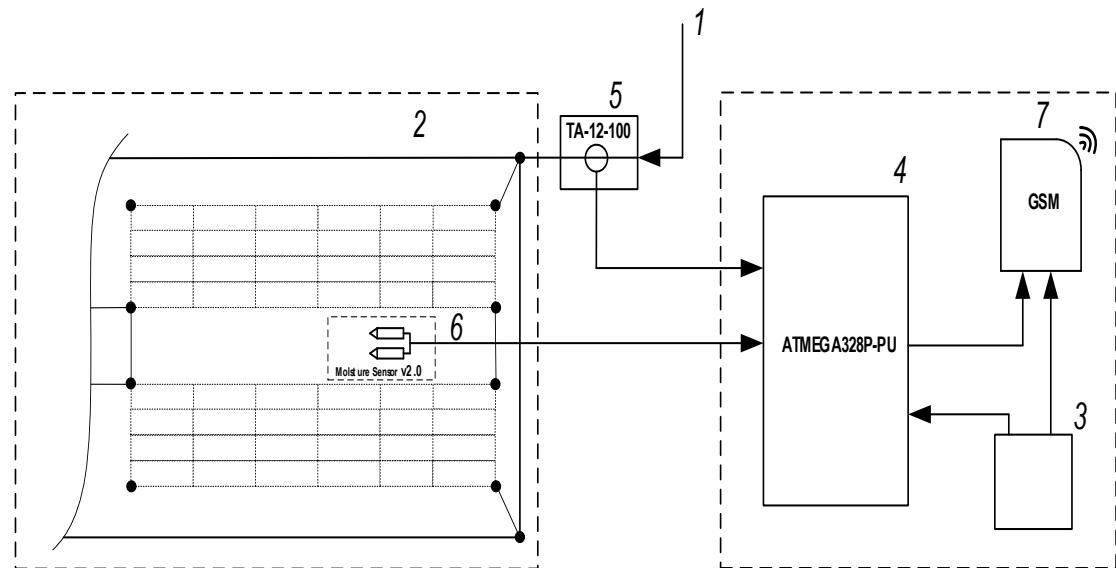


Рисунок 3.1 – Принципиальная электрическая схема автоматизированной системы оценки надежности электрооборудования и его безопасности обслуживания

Как следует из рис. 3.1, «электронным мозгом» разрабатываемого устройства является Atmega328P-PU 4, он принимает цифровые сигналы от соответствующих датчиков, обрабатывает их и отправляет в пункт назначения. Все элементы получают питание от источника выпрямленного тока или от аккумуляторных батарей 3. При подключении источника питания приходят в действие микроконтроллер и другие электронные компоненты схемы.

На принципиальной электрической схеме разрабатываемого устройства изображаем условно графические и буквенные обозначения всех электронных компонентов. Как отмечалось выше, принцип действия разрабатываемого устройства основан на измерении значения влажности грунта и токов, протекающих по заземлителю, и калькуляции их среднегодового значения по методикам, приведенным в § 1.14.

Рассмотрим последовательность действия электронных компонентов: датчик для измерения тока 5 подключается к заземляющему проводнику 1. Этот датчик 5 возможно подключить через трансформатор тока, однако необходимо учитывать погрешность и коэффициент трансформаций измерительного трансформатора. Для измерения влажности грунта электроды емкостного датчика 6 необходимо погружать в месте нахождения заземлителей 2. Этот датчик должен быть погружен в землю над элементами заземлителя с надежным контактом.

Значения тока и влажности грунта через соединительные проводники передаются в микроконтроллер Atmega328P-PU 4, и после их цифровой обработки через GSM-модуль 7 отправляются SMS-сообщением на любой телекоммуникационный абонент. Питание всех элементов осуществляется от источника выпрямленного тока 3 (или аккумуляторный батарей), который подключают к источнику оперативного тока подстанции.

При проверке значения влажности грунта и токов, протекающих по заземлителям, цифровыми устройствами на стадии проектирования необходимо предусматривать периодичность измерения. Эту задачу можно решать при программировании разрабатываемого устройства.

Принципиальная электрическая схема является базовой схемой, на основе которой разрабатываем компьютерную модель автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования.

### 3.3. Разработка компьютерной модели автоматизированной системы

Для разработки компьютерной модели автоматизированной системы оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя воспользуемся пакетом программ **PROTEUS** (рис. 3.2).

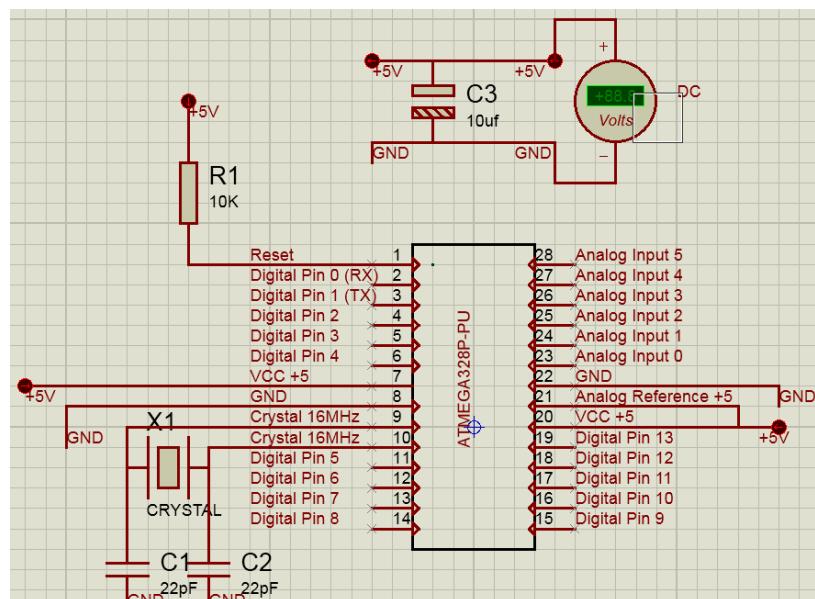


Рисунок 3.2 – Принципиальная электрическая схема подключения ATmega328 на платформе PROTEUS

Этот пакет считается системой компьютерного моделирования схем электронных компонентов. Также, программа имеет возможность разработки программного обеспечения программируемых устройств, таких как микропроцессоры, микроконтроллеры различного типа и назначения DSP (Digital Signal Processing – цифровая обработка сигналов) и др.

Программа для автоматизированного проектирования электронных схем **PROTEUS** имеет «Библиотеку» справочных данных и технические характеристики электронных и цифровых компонентов.

Также, после разработки принципиальной схемы любого устройства при помощи **PROTEUS** можно разрабатывать схему компоновки электронных устройств и монтажных схем печатной платы. Эта программа легко поддерживает подключение и программирование микроконтроллеров семейства ATME<sup>L</sup> [135-136].

На рис. 3.2 приводится схема подключения ATmega328 к другим электронным компонентам. Здесь выбирается тип микроконтроллера с «Библиотека» пакета программ для автоматизированного проектирования электронных схем.

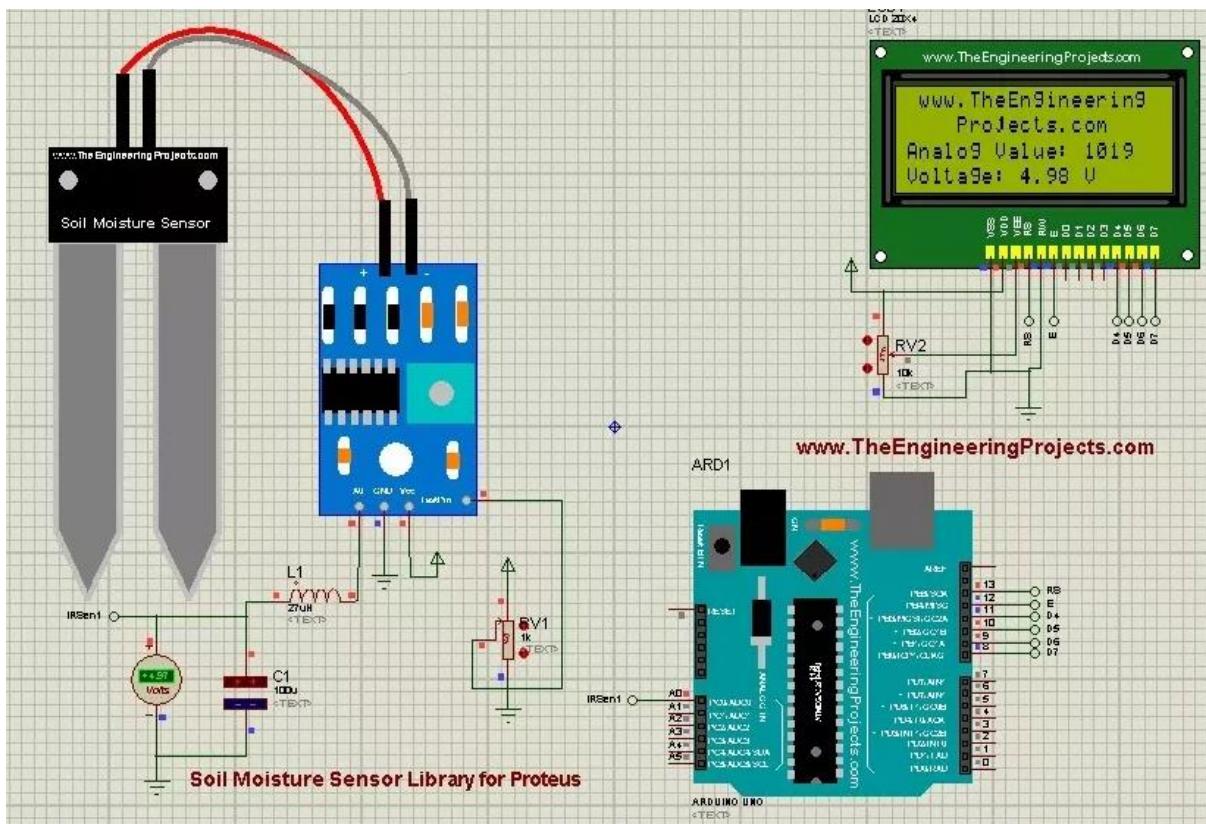


Рисунок 3.3 – Принципиальная электрическая схема подключения ATmega328 к датчикам влажности грунта и переменного тока

Как следует из рис. 3.1, при разработке принципиальной электрической автоматизированной системы в среде PROTEUS необходимо использовать набор виртуальных инструментов, с помощью которых подсоединяют все

последующие элементы разрабатываемого устройства. Затем подбирают другие элементы, которые необходимы для разрабатываемой компьютерной модели.

Таким образом, разработали компьютерную модель автоматизированной системы оценки надежности и безопасности, которая содержит датчики, устройство отображения информации (LCD) и программируемый микроконтроллер.

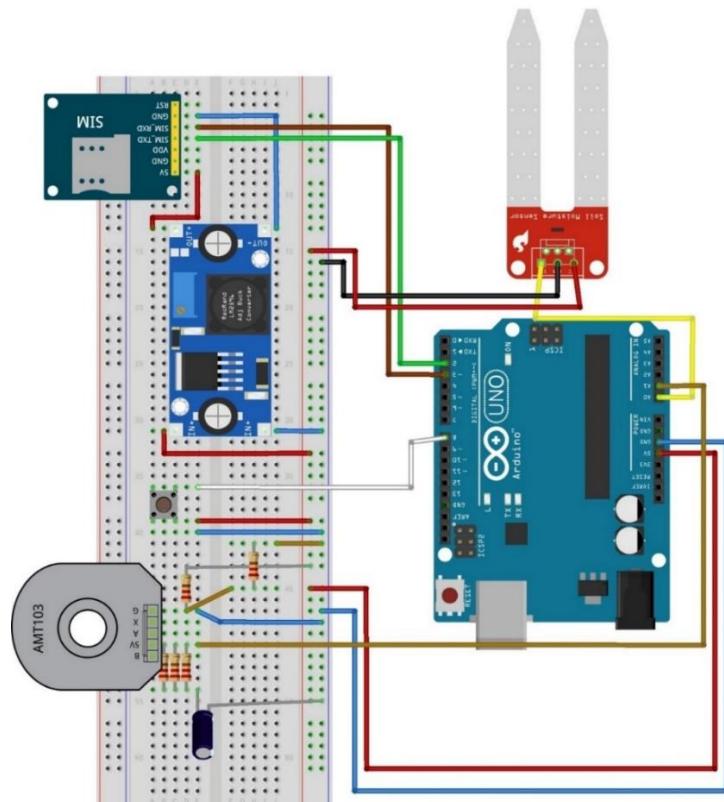


Рисунок 3.4 – Расположение электронных компонентов автоматизированной системы на макетной плате

Для реализации компьютерной модели в реальных условиях необходимо подготовить схему компоновки и их электрическое соединение на макетной плате. На вышеприведенной схеме (рис. 3.4) приводится расположение электронных компонентов на макетной плате. Также, при помощи компьютерной модели (в среде PROTEUS) можно рассматривать работоспособность программного обеспечения автоматизированной системы. Использование макетной платы позволяет разработать предварительный вариант физической модели разрабатываемого устройства.

### 3.4. Разработка автоматизированной системы оценки надежности и безопасности обслуживания электрооборудования

На практике физическая модель разрабатывается с целью исследования факторов, влияющих на изменение параметров исследуемого объекта в реальных условиях. Физические модели выполняют в виде макетов, электрических схем и обоснованной установки.

В рамках диссертационной работы рассматривается разработка автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования (при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя). Данная система, по сути, считается прототипом разрабатываемого устройства, при помощи которого можно определить изменение влажности грунта и токов, протекающих по заземлителям.

Необходимо отметить, что для разработки любого вида физической модели электронных устройств наиболее удобной платформой считаются макетные платы, которые состоят из двух пар шины питания и 65 полос горизонтальных «гнезд», которые называют сигнальными шинами. Электрическое соединение электронных компонентов на макетной плате осуществляют при помощи соединительных проводов.

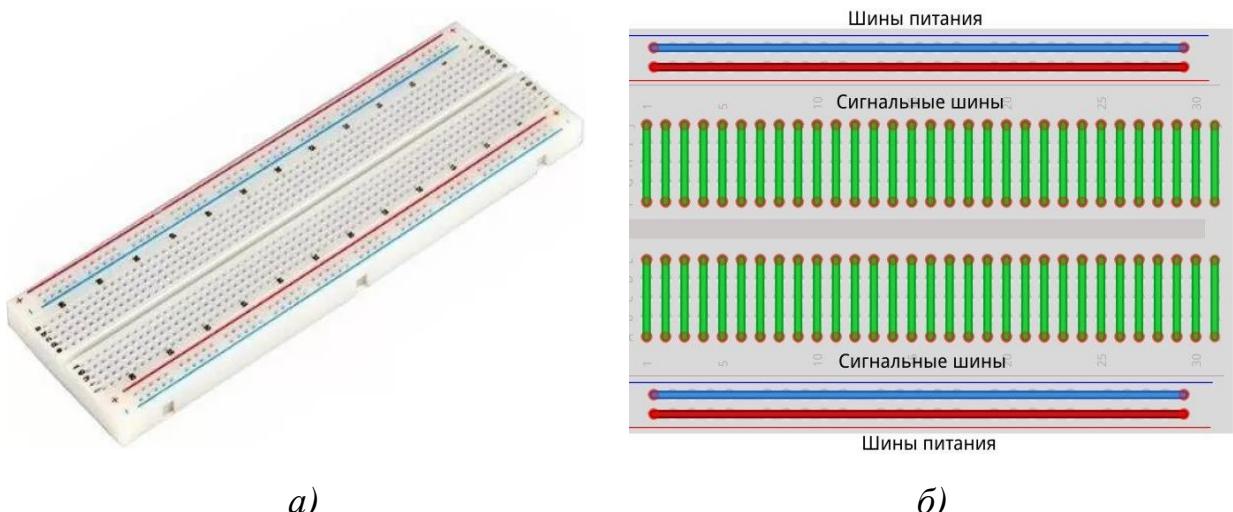


Рисунок 3.5 – Макетная плата: а) общий вид;  
б) электрическая связь соединительных шин

На рис. 3.5 приводится общий вид макетной платы для электронных компонентов. Для разработки физической модели автоматизированной системы на основе вышеприведенной компьютерной модели и принципиальной электрической схемы нами была собрана электрическая схема, состоящая из микроконтроллеров ATmega328, соответствующих датчиков и других электронных компонентов на макетную плату, которая приводится на рис. 3.6.

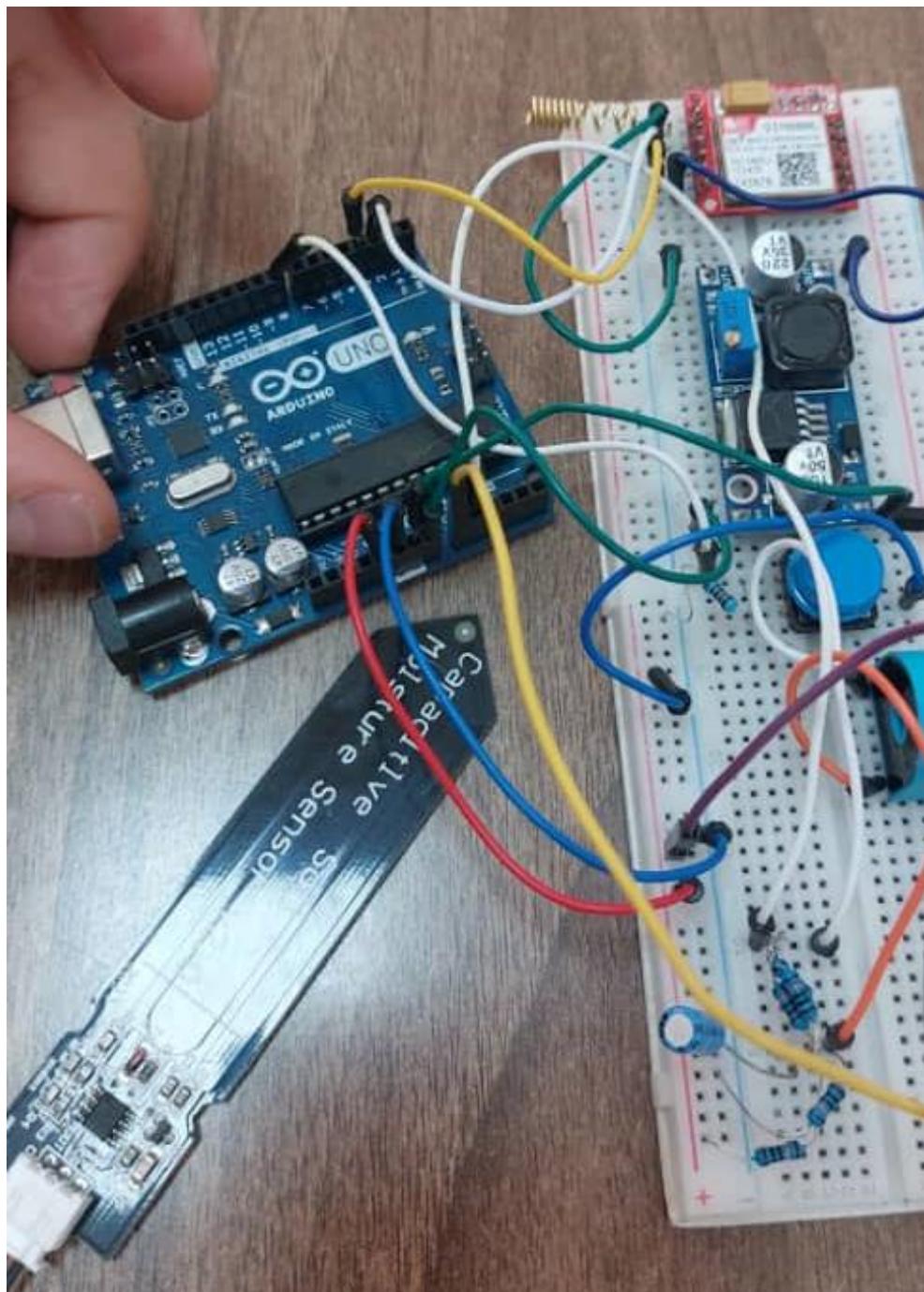


Рисунок 3.6 – Общий вид физической модели на макетную плату

Сперва выбрали макетную плату, на которой разместили микроконтроллер ATmega328 на платформе ArduinoUno, емкостный датчик влажности грунта, датчик переменного тока, GSM-модуль типа SIM800C, блок питания и другие электронные компоненты. Электрическую связь элементов физической модели осуществили при помощи многоразовых соединительных проводов [31-32]. Преимущество таких схем заключается в том, что без пайки можно осуществить переключение или соединение любой микросхемы в физической модели. На рис. 3.7 приводится общий вид разрабатываемой автоматизированной системы оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания.

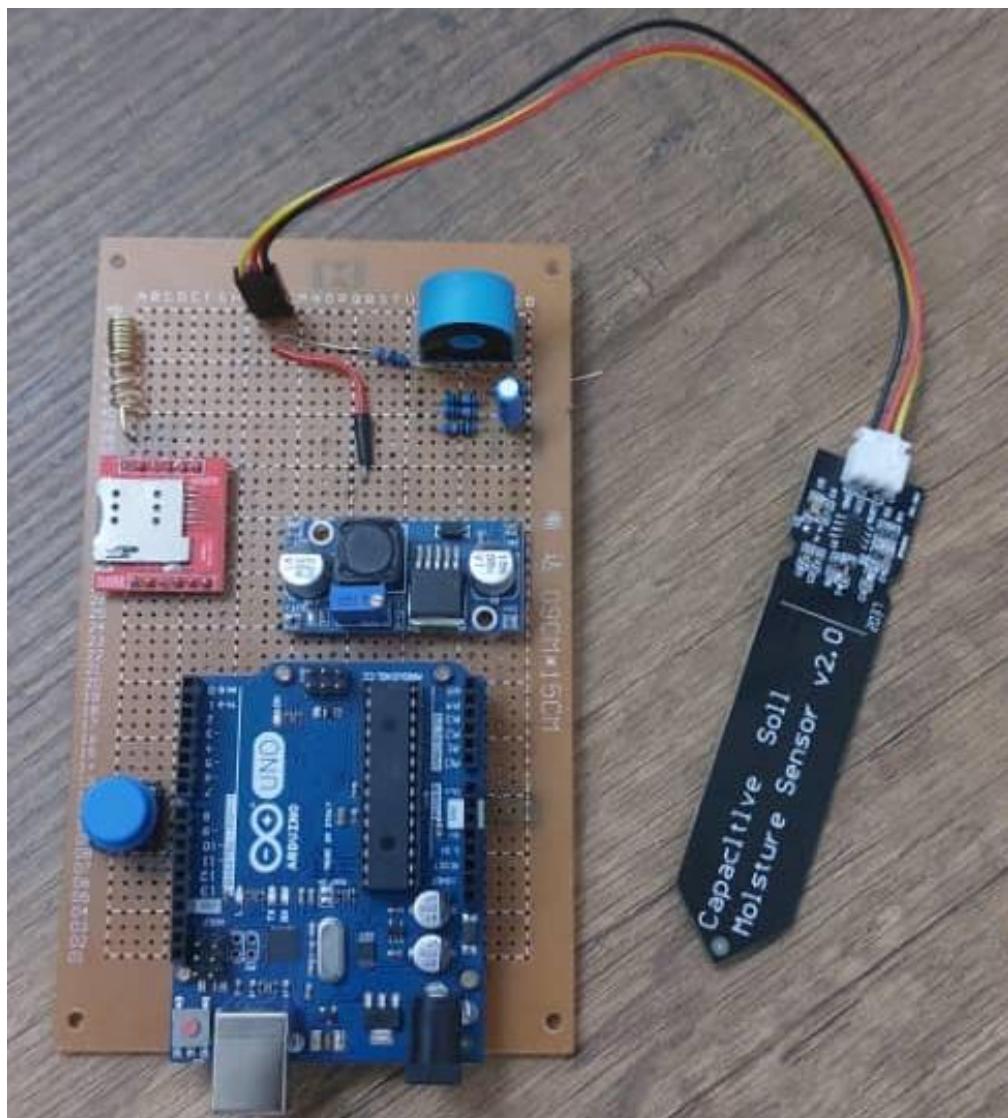


Рисунок 3.7 – Общий вид разработанной автоматизированной системы оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания на печатной плате (лицевая сторона)

Также, проверку работоспособности каждого электронного компонента производили на макетной плате. Затем осуществили испытание разрабатываемого устройства под напряжением. После многоразовых проверок и испытаний пришли к выводу, что физическая модель способна произвести измерение влажности грунта и токов, протекающих по заземлителям.

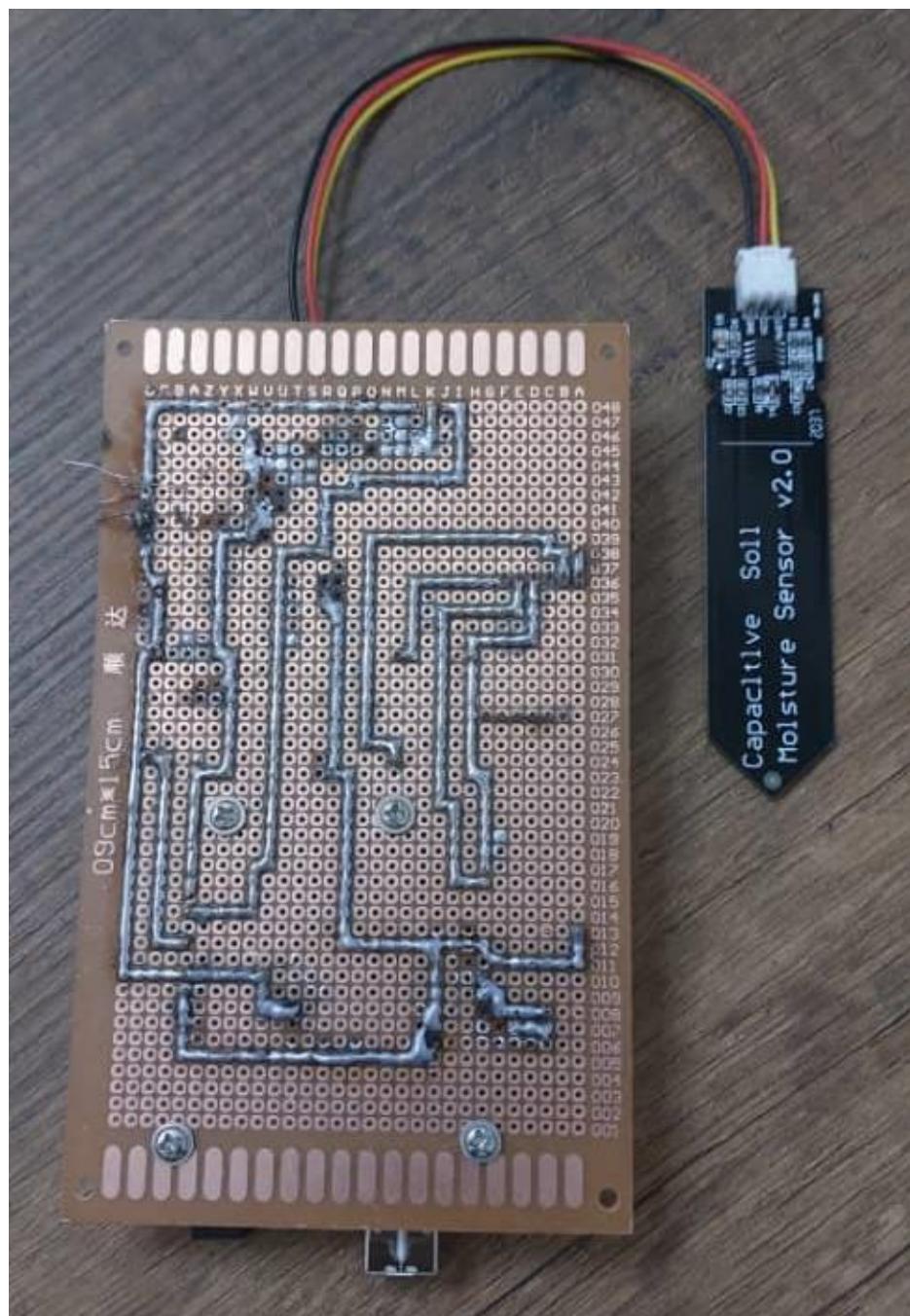


Рисунок 3.8 – Общий вид разработанной автоматизированной системы оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания на печатной плате (обратная сторона)

На рис. 3.8 приводится обратная сторона разрабатываемой автоматизированной системы, соединение элементов которой было осуществлено при пайке вертикальных и горизонтальных полос. Размер печатной платы составляет 90 мм на 150 мм. Интервал между отверстиями используемой печатной платы соответствует размерам выводов электронных компонентов.

Таким образом, нами был разработан прототип автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования, которая функционирует при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя. При этом необходимо отметить, что функционирование разработанного устройства обеспечивается при программировании используемого микроконтроллера и соответствующих датчиков.

### 3.5. Программное обеспечение автоматизированной системы

Как известно, в настоящее время современные цифровые устройства без применения специального программного обеспечения фактически не могут правильно функционировать [123-128, 133, 134, 140, 2-А, 7-А]. Для программирования цифровых устройств необходимы их функциональная схема, последовательность действия элементов и параметры электронных компонентов [49, 59, 70, 77, 81, 82].

При разработке функциональной схемы разрабатываемого устройства использовали принципиальную электрическую схему, приведенную на рис. 3.1. Здесь указывали последовательность действия микроконтроллера ATmega328, соответствующие датчики и GSM-модуль. Разработанная нами структурная схема автоматизированной системы оценки надежности и безопасности приводится на рис. 3.9.

Программное обеспечение микроконтроллеров семейства Atmel осуществляют различными языками программирования. Поскольку, современные модели AVR-микроконтроллеров имеют большое количество

периферийных устройств и поддерживают одновременно до трех интерфейсов программирования. Также, существует возможность самопрограммирования при помощи пользовательской программы. Кроме этого, программирование микроконтроллера можно реализовать через Flash-память.

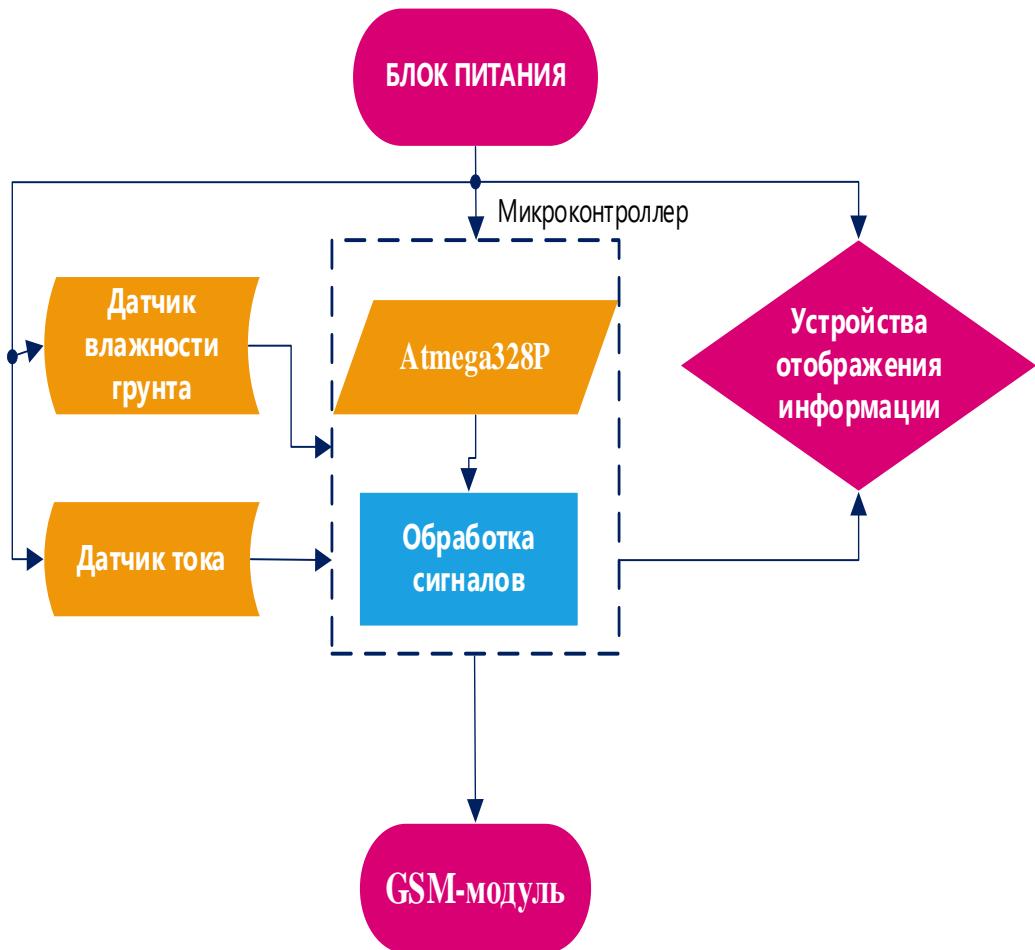


Рисунок 3.9 – Структурная схема автоматизированной системы

Необходимо отметить, что процесс программирования микроконтроллеров проходит при низком, среднем и высоком напряжениях, через соответствующие их выводы. Как отмечается выше, выводами микроконтроллеров для их программирования посредством модуля SPI являются MOSI, SCK, MISO, RESET и GND.

Последний вывод используется для общего питания самого микроконтроллера и программатора. На рис. 3.10 показана схема подключения микроконтроллера семейства Atmel к программатору.

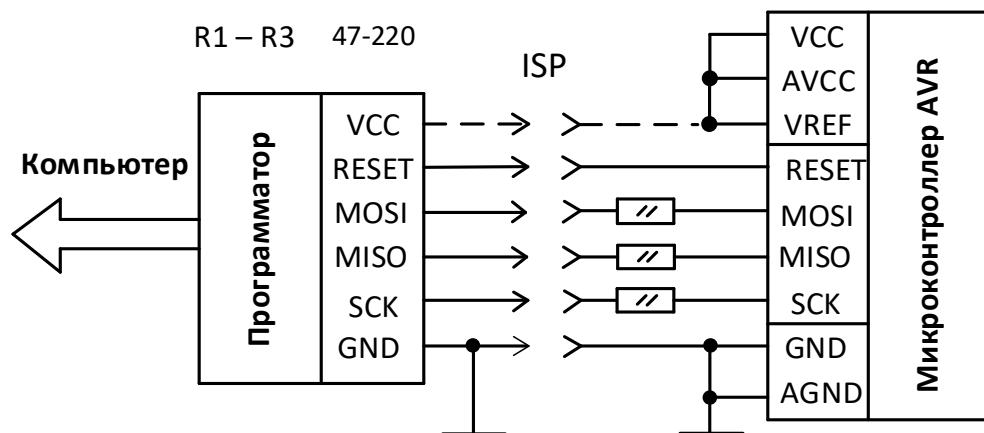


Рисунок 3.10 – Схема подключения микроконтроллера семейства Atmel к программатору

Как следует из рис. 3.10, в цепях MOSI, MISO, SCK подключены последовательные низкоомные сопротивления, которые необходимы для обеспечения надежности в процессе программирования микроконтроллеров. При этом разность потенциала между источниками питания программатора и микроконтроллера не должна быть высокой.

Кроме того, один вывод возможно использовать по нескольким назначениям, т.е. после программирования ATmega328 соответствующие его выводы (PB3, PB4 и SCK, которые размещены в пинах 17, 18 и 19) могут выполнять основную функцию.

Ниже приводится разработанное программное обеспечение для физической модели (автоматизированной системы оценки) на платформе Arduino.

```
#include "Adafruit_FONA.h"
#define FONA_RX 2
#define FONA_TX 3
#define FONA_RST 4
```

```

#define BUTTON_PIN 8
#include "EmonLib.h"
EnergyMonitor emon1;
{
int waterSensorVal = 0;
int waterSensorPercentage = 0;
const int dry = 550;
const int wet = 380;
unsigned long previousMillis = 0;
const long timeInterval = 3600000; // 1h
{
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial fonaSS = SoftwareSerial (FONA_TX, FONA_RX);
SoftwareSerial *fonaSerial = &fonaSS;

Adafruit_FONA fona = Adafruit_FONA(FONA_RST);

uint8_t readline (char *buff, uint8_t maxbuff, uint16_t timeout = 0);

short sButton_Read = 0;
short smsSend = 0;
char smsMessage [20];
// char *smsNumber = "+992*****";
char *smsNumber = "+992*****";

```

Номера телефона могут быть оператором любой телекоммуникационной компании.

```

unsigned short gusIsSend_Bef = 0;
void setup ()
{
emon1.current (1, 27.59); // Current: input pin, calibration
pinMode (BUTTON_PIN, INPUT);

```

```

Serial.begin(115200);
Serial.println(F("FONA SMS caller ID test"));
Serial.println(F("Initializing....(May take 3 seconds)"));
// make it slow so its easy to read!
fonaSerial->begin(4800);
if (! fona.begin(*fonaSerial))
{
  Serial.println(F("Couldn't find FONA"));
  while(1);
}
Serial.println(F("FONA is OK"));
// Print SIM card IMEI number.
char imei[16] = {0}; // MUST use a 16 character buffer for IMEI!
uint8_t imeiLen = fona.getIMEI(imei);
if (imeiLen > 0)
{
  Serial.print("SIM card IMEI: "); Serial.println(imei);
}
fonaSerial->print("AT+CNMI=2,1\r\n"); //set up the FONA to send a
+CMTI notification when an SMS is received
Serial.println("FONA Ready");
}
void loop()
{
  unsigned long currentMillis = millis();
  if (currentMillis - previousMillis >= timeInterval) {
    previousMillis = currentMillis;
    smsSend = 1;
  }
}

```

```

waterSensorVal = analogRead(A0);
waterSensorPercentage = map (waterSensorVal,wet,dry,100,0);
//      Serial.print("water sensor: ");  Serial.print(waterSensorVal);
Serial.print(", ");Serial.print(waterSensorPercentage);Serial.println("%");
// delay(100);

double currentIrms = emon1.calcIrms(1480)/10; // Calculate Irms only
// Serial.print("current sensor: "); Serial.println(currentIrms);
// delay (100);

memset(smsMessage, 0, sizeof(smsMessage)); // clear the buffer
sprintf(smsMessage, "%d%%, ", waterSensorPercentage);
char buf[10];
dtostrf(currentIrms, 3, 2, buf);
strcat(buf,"A");
strcat(smsMessage,buf);
sButton_Read = sRead_Button();
Serial.println(smsMessage);
if (sButton_Read == 1 || smsSend == 1)
{
  if(gusIsSend_Bef == 0)
  {
    if (!fona.sendSMS(smsNumber, smsMessage))
    {
      Serial.println (F("Failed"));
    }
    else
    {
      Serial.println(F("Sent!"));
    }
  gusIsSend_Bef = 1;
}

```

```

    }

smsSend = 0;

delay(1000);

}

else

{

    gusIsSend_Bef = 0;

}

}

short sRead_Button()

{

    short sButton_Value = 0;

    sButton_Value = digitalRead(BUTTON_PIN);

    return sButton_Value;

}

```

Следовательно, было выполнено программное обеспечение автоматизированной системы (при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя).

**#include "Adafruit\_FONA.h"**- Эта строка указывает компилятору Arduino включить библиотеку Adafruit FONA. Эта библиотека предоставляет функции для взаимодействия с модулем сотовой связи FONA. Когда вы включаете «Adafruit\_FONA.h» в свой код, вы, по сути, указываете компилятору сделать доступными все определения, константы и прототипы функций, необходимые для работы с модулем Adafruit FONA. Это позволяет вам написать код, который может инициализировать модуль, отправлять ему команды и извлекать из него данные, обеспечивая различные функции, такие как совершение телефонных звонков, отправка SMS-сообщений и даже доступ к основным интернет-услугам через сеть GSM/LTE [83, 108, 110].

**#include "Adafruit\_FONA.h"**- Эта строка указывает компилятору Arduino включить библиотеку Adafruit FONA. Эта библиотека предоставляет функции

для взаимодействия с модулем сотовой связи FONA. Когда вы включаете «Adafruit\_FONA.h» в свой код, вы, по сути, указываете компилятору сделать доступными все определения, константы и прототипы функций, необходимые для работы с модулем Adafruit FONA. Это позволяет вам написать код, который может инициализировать модуль, отправлять ему команды и извлекать из него данные, обеспечивая различные функции, такие как совершение телефонных звонков, отправка SMS-сообщений и даже доступ к основным интернет-услугам через сеть GSM/LTE [75].

**#define FONA\_RX 2** - Стока `#define FONA_RX 2` в вашем коде Arduino представляет собой директиву препроцессора, которая определяет константу с именем `FONA_RX` со значением 2. При написании кода для взаимодействия с аппаратными модулями, такими как Adafruit FONA, вам часто необходимо указать, какие контакты микроконтроллера подключены к каким контактам модуля (например, RX, TX для связи UART). Используя `#define FONA_RX 2`, вы устанавливаете, что контакт 2 специально предназначен для приема данных (RX) от модуля FONA [54].

**#define FONA\_TX 3** - Стока `#define FONA_TX 3` в вашем коде Arduino соответствует тому же принципу, что и ранее объясненная `#define FONA_RX 2`. Таким образом, `#define FONA_TX 3` устанавливает `FONA_TX` как константу со значением 3, обычно используемую для обозначения передающего контакта для связи с модулем FONA Adafruit или аналогичными периферийными устройствами.

**#define FONA\_RST 4** - Стока `#define FONA_RST 4` в вашем коде Arduino соответствует тому же шаблону, что и предыдущие строки `#define FONA_RX 2` и `#define FONA_TX 3`. Итак, `#define FONA_RST 4` просто определяет `FONA_RST` как 4 во всей вашей программе. Это обычная практика в программировании на C и C++, особенно во встроенных системах, таких как Arduino, где часто происходит прямое манипулирование аппаратными выводами.

**#define BUTTON\_PIN 8** - Стока `#define BUTTON_PIN 8` в вашем коде Arduino определяет константу с именем `BUTTON_PIN` со значением 8.

**#include "EmonLib.h"** - Эта строка включает библиотеку EmonLib в ваш эскиз Arduino. Эта библиотека предоставляет функции и классы для работы с датчиками тока и напряжения для расчета различных электрических параметров, таких как активная мощность, полная мощность и коэффициент мощности.

**Energy Monitor emon1;** - Эта строка объявляет объект типа EnergyMonitor с именем emon1. Этот объект будет использоваться для взаимодействия с функциями EmonLib и хранения собранных электрических данных. Таким образом, EnergyMonitor emon1; – это оператор, который объявляет и потенциально инициализирует объект emon1 типа EnergyMonitor. Затем этот объект можно использовать для взаимодействия с данными и манипулирования ими, а также для выполнения операций, определенных в классе EnergyMonitor.

**int waterSensorVal = 0;** - В этой строке объявляется целочисленная переменная с именем WaterSensorVal и инициализируется значением 0. Эта переменная, скорее всего, будет хранить необработанные аналоговые показания вашего датчика воды. Таким образом, int WaterSensorVal = 0; объявляет переменную с именем WaterSensorVal типа int и инициализирует ее значением 0. Это настраивает переменную для использования в вашей программе, позволяя вам хранить и манипулировать целочисленными значениями, связанными с вашим датчиком воды или любыми другими соответствующими данными в вашем приложении.

**int waterSensorPercentage = 0;** - Как и в предыдущей строке, здесь объявляется целочисленная переменная с именем WaterSensorPercentage и инициализируется значением 0. Эта переменная может содержать рассчитанный процент уровня воды на основе показаний датчика. По сути, int WaterSensorPercentage = 0; объявляет переменную с именем WaterSensorPercentage типа int и инициализирует ее значением 0. Это подготавливает переменную для использования в вашей программе, позволяя вам хранить и манипулировать целочисленными значениями, связанными с процентными данными вашего датчика воды или любым другим соответствующим показателем в вашем приложении.

**const int dry = 550;** - Эта строка определяет постоянную целочисленную переменную с именем Dry со значением 550. Вероятно, это представляет собой показания аналогового датчика, когда окружающая среда вокруг датчика сухая.

**const int wet = 380;** - Эта строка определяет постоянную целочисленную переменную с именем «мокрый» и значением 380. Вероятно, это представляет собой показания аналогового датчика, когда среда вокруг датчика влажная.

**unsigned long previousMillis = 0;** - Эта строка объявляет беззнаковую длинную переменную с именем previousMillis и инициализирует ее значением 0. Эта переменная, скорее всего, будет использоваться для хранения отметки времени последнего показания датчика, чтобы гарантировать, что показания будут сняты через определенные промежутки времени.

**const long timeInterval = 3600000; // 1h** - В этой строке определяется постоянная длинная переменная с именем timeInterval со значением 3600000. Это значение представляет один час в миллисекундах (1 час \* 60 минут \* 60 секунд \* 1000 миллисекунд). Эта константа определяет минимальный интервал времени между показаниями датчика.

**#include <SoftwareSerial.h>** - Эта строка включает библиотеку SoftwareSerial в ваш эскиз Arduino. Эта библиотека позволяет эмулировать последовательную связь оборудования с помощью цифровых выводов Arduino.

**SoftwareSerial fonaSS = SoftwareSerial(FONA\_TX, FONA\_RX);** - Эта строка создает программный последовательный объект с именем **fonaSS**.

Требуется два аргумента:

- **FONA\_TX**: вероятно, это постоянное целое число, которое определяет вывод Arduino, подключенный к выводу передачи (TX) модуля FONA;
- **FONA\_RX**: вероятно, это еще одно постоянное целое число, которое определяет вывод Arduino, подключенный к выводу приема (RX) модуля FONA.

**SoftwareSerial \*fonaSerial = &fonaSS;** - эта строка создает указатель с именем fonaSerial и присваивает ему адрес объекта fonaSS. Это позволяет использовать fonaSerial для взаимодействия с каналом последовательной связи программного обеспечения.

**Adafruit\_FONA fona = Adafruit\_FONA(FONA\_RST);** - эта строка создает объект с именем fona класса Adafruit\_FONA. Вероятно, это инициализирует связь с модулем сотовой связи FONA, подключенным к вашей плате Arduino.

**UInt8\_t readline(char \*buff, uint8\_t maxbuff, uint16\_t timeout = 0);** - эта строка может быть объявлением функции, но без контекста внутри более крупного блока кода трудно сказать наверняка. Вот возможная интерпретация:

- **uint8\_t:** определяет тип возвращаемого значения функции, которое представляет собой 8-битное целое число без знака;
- **readline(char \*buff, uint8\_t maxbuff, uint16\_t timeout = 0);:** Это сигнатура функции;
- **readline:** это название функции, которая, вероятно, используется для чтения данных из последовательного канала связи, подключенного к модулю FONA;
- **char \*buff:** это первый аргумент, указатель на символ (char \*), указывающий на буфер, в котором будут храниться считанные данные;
- **uint8\_t maxbuff:** это второй аргумент, 8-битное целое число без знака, которое определяет максимальный размер буфера, на который указывает **buff**;
- **uint16\_t timeout = 0:** это третий аргумент, необязательное 16-битное целое число без знака, которое определяет значение тайм-аута в миллисекундах для чтения данных. Значение по умолчанию – 0, что означает отсутствие тайм-аута.

**Short sButton\_Read = 0;** - Эта строка объявляет короткую целочисленную переменную с именем sButton\_Read и инициализирует ее значением 0. Эту переменную можно использовать для хранения состояния (нажата или не нажата)

кнопки, подключенной к Arduino. short используется для экономии памяти по сравнению с int, если состояние кнопки включает только положительные или отрицательные значения.

**Short smsSend = 0;** - В этой строке объявляется еще одна короткая целочисленная переменная с именем smsSend и инициализируется значением 0. Назначение этой переменной менее понятно без дальнейшего контекста. Это может быть флаг, указывающий, было ли отправлено SMS или нет (0 = не отправлено, 1 = отправлено).

**Char smsMessage [20];** - В этой строке объявляется массив символов с именем smsMessage размером 20. Скорее всего, в этом массиве будет храниться содержимое текстового сообщения, которое будет отправлено через SMS.

```
//char *smsNumber = "+992*****";
```

**char \*smsNumber = "+992\*\*\*\*\*";** - Эти строки определяют указатель на символ с именем smsNumber. Изначально они закомментированы, но незакомментированная строка присваивает указателю номер телефона «+992908996261». Этот номер телефона будет получателем SMS-сообщения.

**unsigned short gusIsSend\_Bef = 0;** - Фрагмент кода unsigned short gusIsSend\_Bef = 0; объявляет переменную с именем gusIsSend\_Bef и инициализирует ее значением 0. Вот разбивка ее компонентов:

- **unsigned:** это ключевое слово указывает, что переменная gusIsSend\_Bef может хранить только неотрицательные целые значения (0 и положительные числа);
- **short:** это указывает на то, что переменная представляет собой короткое целое число, которое обычно использует 16 бит памяти. Это экономит память по сравнению с целым числом, если ожидаемые значения находятся в диапазоне от 0 до 65535;
- **gusIsSend\_Bef:** это имя, присвоенное переменной. Значение «gus» и «Bef», вероятно, зависит от вашего кода и может быть аббревиатурой чего-то, связанного с отправкой SMS;

- **= 0:** это присваивает переменной начальное значение 0.
- **void setup()** - В программировании Arduino void setup – это специальная функция, которая вызывается автоматически один раз в самом начале вашей программы, сразу после включения или перезагрузки Arduino. Обычно он используется для инициализации переменных, настройки контактов и настройки любых библиотек, которые вы можете использовать в своем эскизе.

```
{
  emon1.current(1, 27.59);      // Current: input pin, calibration
```

**PinMode(BUTTON\_PIN, INPUT);** - Эта строка устанавливает контакт, определенный BUTTON\_PIN (вероятно, определенный ранее в вашем коде), в качестве входного контакта. Это означает, что Arduino будет считывать уровень напряжения на этом выводе, чтобы обнаружить нажатия кнопок (при условии, что кнопка подключена через резистор к земле или напряжению).

**Serial.begin(115200);** - Эта строка инициализирует последовательную связь между Arduino и вашим компьютером.

- **Serial** - Это относится к встроенному последовательному объекту Arduino для связи.
- **.begin(115200):** этот вызов функции устанавливает скорость передачи данных для последовательной связи на уровне 115200 бит в секунду (бит/с). Это обычная скорость передачи данных между Arduino и компьютером.

**Serial.println(F("FONA SMS caller ID test"));** - Эта строка выводит сообщение на последовательный монитор, подключенный к вашей Arduino IDE.

**Serial.println(F("Initializing....(May take 3 seconds)"));** - Эта строка аналогична предыдущей: она выводит еще одно сообщение на последовательный монитор. Это сообщение означает, что программа инициализируется и может занять 3 секунды.

**// make it slow so its easy to read!** – Это комментарий, подтверждающий, что в следующей строке установлена более медленная скорость передачи данных (4800 бод) для облегчения чтения последовательной связи на вашем компьютере. По умолчанию последовательная связь может быть довольно быстрой, что затрудняет просмотр отдельных передаваемых символов.

**fonaSerial->begin(4800);** - Эта строка устанавливает скорость передачи данных для последовательного канала связи программного обеспечения (fonaSerial) на уровне 4800 бит/с. Вероятно, вы определили fonaSerial ранее в своем коде, используя SoftwareSerial fonaSS = SoftwareSerial(FONA\_TX, FONA\_RX); установить программный последовательный канал связи на определенных выводах.

**if (! fona.begin(\*fonaSerial))** - Эта строка проверяет наличие ошибок во время инициализации связи с модулем FONA и включает оператор if для условного выполнения.

```
{
    Serial.println(F("Couldn't      find      FONA"));      -      Стока
    Serial.println(F("Couldn't find FONA"));      -      это сообщение об ошибке,
выводимое на последовательный монитор вашей Arduino IDE. Это указывает на
то, что коду Arduino не удалось установить связь с модулем сотовой связи FONA,
подключенным к плате.
```

```
    While(1);
}
```

**Serial.println(F("FONA is OK"));** - Стока **Serial.println(F("FONA is OK"));** в коде Arduino служит двум целям: информативному сообщению и потенциальной помощи при отладке. Вот разбивка:

- **Serial:** это относится к встроенному последовательному объекту Arduino для связи с вашим компьютером.
- **.println():** эта функция печатает предоставленное сообщение на последовательном мониторе и добавляет в конце символ новой строки.

- **F("FONA is OK"):** это строковый литерал, заключенный в макрос F(), который повышает эффективность программы за счет сохранения сообщения в памяти программы. На последовательном мониторе отображается сообщение «FONA is OK».

**// Print SIM card IMEI number.** - Это односторонний комментарий, объясняющий назначение следующего блока кода:

**char imei[16] = {0}; // MUST use a 16 character buffer for IMEI!** - Эта строка объявляет массив символов с именем `imei` размером 16 элементов. `= {0}` инициализирует все элементы значением 0, обеспечивая чистоту хранения цифр IMEI. В комментарии подчеркивается важность 16-значного размера для размещения 15-значного номера IMEI и нулевого терминатора.

**uint8\_t imeiLen = fona.getIMEI(imei);** - Эта строка вызывает функцию `getIMEI()`, предоставляемую библиотекой FONA, для получения номера IMEI с SIM-карты.

**if (imeiLen > 0)** - Этот оператор `if` проверяет, превышает ли значение `imeiLen` 0. Положительная длина указывает на успешное получение номера IMEI (даже если это однозначный номер IMEI).

{

**Serial.print("SIM card IMEI: "); Serial.println(imei);** - Фрагмент кода `Serial.print("IMEI SIM-карты: "); Serial.println(IMEI);` печатает метку «IMEI SIM-карты:», за которой следует содержимое массива символов `imei`, на последовательный монитор вашей Arduino IDE.

}

**fonaSerial->print("AT+CNMI=2,1\r\n"); //set up the FONA to send a +CMTI notification when an SMS is received** - Стока `fonaSerial->print("AT+CNMI=2,1\r\n");` в вашем коде Arduino настраивает модуль сотовой связи FONA для отправки уведомлений при получении нового SMS-сообщения. Вот разбивка того, что он делает:

- **fonaSerial:** это относится к каналу последовательной связи программного обеспечения, который вы, вероятно, определили ранее в своем коде, используя SoftwareSerial fonaSerial =
- **SoftwareSerial(FONA\_TX, FONA\_RX);.** Это канал связи, используемый для отправки команд (AT-команд) модулю FONA.

**Serial.println("FONA Ready");** - Стока `Serial.println("FONA Ready");` в коде Arduino служит двум основным целям:

1. Информационное сообщение:

- Прежде всего, он выводит сообщение «FONA Ready» на последовательный монитор вашей Arduino IDE. Это служит визуальным подтверждением того, что связь между вашим Arduino и сотовым модулем FONA успешно установлена.
- Он обеспечивает ценную обратную связь во время выполнения программы, особенно при устранении проблем с подключением.

2. Потенциальная помощь при отладке:

- В контексте фрагментов кода, которые вы, возможно, видели ранее (где была обработка ошибок при инициализации FONA), эта строка может служить подтверждением того, что установка связи прошла успешно и код вышел за пределы раздела обработки ошибок.

}

**void loop()** - В программировании Arduino функция `voidloop()` является сердцем вашей программы. Это специальная функция, которая выполняется постоянно, пока ваша плата Arduino включена, и программа работает. Вот разбивка его значения:

### **Непрерывное выполнение:**

- В отличие от других функций в вашем коде, которые могут вызываться только один раз или при определенных условиях, `voidloop()` предназначен для бесконечного выполнения в цикле.

- Такое непрерывное выполнение позволяет вашей программе постоянно контролировать датчики, реагировать на ввод пользователя, управлять устройствами и выполнять другие задачи в реальном времени.

### **Основная функциональность:**

- Код, который вы помещаете в функцию voidloop(), определяет основное поведение вашей программы Arduino. Здесь вы пишете логику и инструкции, которые определяют, что программа будет делать повторно.
- Это раздел, в котором вы обычно считываете значения датчиков, принимаете решения на основе этих показаний, управляете выходами, такими как светодиоды или двигатели, и потенциально взаимодействуете с другими модулями или устройствами, подключенными к вашей плате Arduino.

{

**unsigned long currentMillis = millis();** - В этой строке объявляется переменная с именем currentMillis типа unsigned long. Этот тип может хранить большие неотрицательные целочисленные значения, подходящие для представления времени в миллисекундах.

**if (currentMillis - previousMillis >= timeInterval) {**

- Оператор if: эта строка инициирует оператор if, который проверяет условие для запуска события (в данном случае отправка SMS-сообщения).
- **Разница во времени (Time Difference):** выражение **currentMillis - previousMillis** вычисляет время, прошедшее с момента последней проверки.
- **Сравнение (Compare):** оператор **> =** сравнивает прошедшее время **(currentMillis - previousMillis)** с переменной **timeInterval**.
- **timeInterval:** скорее всего, это переменная, объявленная ранее в вашем коде, которая определяет желаемый интервал между передачами SMS (в миллисекундах).

smsSend = 1;

- **Триггерная переменная (Trigger Variable):** в этой строке предполагается, что существует переменная с именем smsSend (вероятно, объявленная ранее в вашем коде).
- **Установка флага (Setting the flag):** здесь smsSend присваивается значение 1. Вероятно, это действует как флаг или триггер. Установка значения 1 может указывать на то, что пришло время отправить SMS-сообщение.

**waterSensorVal = analogRead(A0);** - Стока WaterSensorVal = AnalogRead(A0); в коде Arduino служит для чтения значения аналогового датчика и сохранения его в переменной. Вот разбивка его функциональности:

**waterSensorPercentage = map(waterSensorVal, wet,dry,100,0);** - Линия WaterSensorPercentage = Map(waterSensorVal, влажный, сухой, 100, 0); в вашем коде Arduino используется функция map() для преобразования необработанного значения датчика в процентное значение, представляющее уровень влажности.

// Serial. Print ("water sensor: "); Serial.print(waterSensorVal); Serial.print(", "); Serial.print(waterSensorPercentage); Serial.println("%");

**// delay(100);** - В строке используется функция задержки(), встроенная функция Arduino.

**double currentIrms = emon1.calcIrms(1480)/10; // Calculate Irms only** - Стока double currentIrms = emon1.calcIrms(1480)/10; // Calculate Irms вычисляет только среднеквадратическое значение тока (RMS) на основе данных, вероятно, полученных от датчика тока, подключенного к вашему Arduino, с использованием библиотеки EmonLib.

**// Serial.print ("current sensor: "); Serial.println (currentIrms);** - в вашем коде Arduino демонстрирует, как вы можете использовать последовательную связь для печати рассчитанного среднеквадратического значения тока (хранящегося в currentIrms) на последовательный монитор вашей Arduino IDE.

**// delay(100);** - В строке используется функция задержки(), встроенная функция Arduino.

**memset(smsMessage, 0, sizeof(smsMessage)); // clear the buffer** - Стока `memset(smsMessage, 0, sizeof(smsMessage));` использует функцию `memset` для очистки содержимого буфера с именем `smsMessage` в вашем коде C.

**print(smsMessage, “%d%%, “, waterSensorPercentage);** - Используемая вами функция печати зависит от контекста. Вероятно, это часть конкретной библиотеки или платформы, с которой вы работаете (а не стандартная функция Arduino `Serial.print()`).

**char buf[10];** - объявляет массив символов с именем `buf` в C. Вот разбивка его компонентов:

- **Char:** - Это определяет тип данных элементов массива. В этом случае каждый элемент будет представлять собой один символ. Символы в C могут хранить одну букву, цифру, символ или управляющий код.
- **buf:** - Это имя, которое вы присваиваете массиву. Вы можете выбрать любое допустимое имя-идентификатор для вашего массива.

**dtostrf(currentIrms, 3, 2, buf);** - Стока `dtostrf(currentIrms, 3, 2, buf);` в вашем коде Arduino используется функция `dtostrf` (вероятно, из внешней библиотеки) для преобразования значения с плавающей запятой (`currentIrms`) в строковое представление определенного формата и сохранения его в массиве символов (`buf`).

**strcat(buf,"A");**

**strcat(smsMessage,buf);** - Стока `strcat(buf, "A");` в вашем коде Arduino пытается добавить символ «A» в конец строки, хранящейся в массиве символов `buf`. Однако использование `strcat` здесь обычно не рекомендуется из-за потенциальных проблем безопасности при программировании Arduino. Вот разбивка функциональности и более безопасной альтернативы:

1. **strcat** Функция:

- **strcat** – это стандартная библиотечная функция C, которая объединяет (объединяет) две строки.

- Он добавляет символы из второй строки (источника) в конец первой строки (назначения).

2. Аргументы:

- **buf**: это массив символов, который, скорее всего, содержит существующую строку (возможно, преобразованное текущее значение из **dtostrf**).
- «A»: это строковый литерал, содержащий один символ «A», который вы хотите добавить в конец строки в **buf**.

**Button\_Read = sRead\_Button();** - в вашем коде Arduino, скорее всего, речь идет о чтении состояния кнопки и сохранении его в переменной.

**Serial.println(smsMessage);** - Стока **Serial.println(smsMessage);** в вашем коде Arduino используется встроенный объект **Serial** для печати содержимого символьного массива **smsMessage** на последовательный монитор вашей Arduino IDE.

**if(sButton\_Read == 1 || smsSend == 1)** - представляет оператор **if** в вашем коде Arduino, который проверяет два условия.

{

**if(gusIsSend\_Bef == 0)** - Стока **if(gusIsSend\_Bef == 0)** в вашем коде Arduino представляет собой оператор **if**, который проверяет условие, связанное с переменной с именем **gusIsSend\_Bef**.

{

**if(!fona.sendSMS(smsNumber, smsMessage))** - Стока **if(!fona.sendSMS(smsNumber, smsMessage))** в вашем коде Arduino, скорее всего, проверяет результат отправки SMS-сообщения и выполняет действие на основе результата.

{

**Serial.println(F("Failed"));** - Стока **Serial.println(F("Failed"));** в вашем коде Arduino используется объект **Serial** и макрос **F()** для вывода сообщения «Failed» на последовательный монитор.

```
 }
```

**else** - Оператор else в вашем коде Arduino представляет собой часть «else» условной структуры if...else.

```
{
```

**Serial.println(F("Sent!"));** - Стока Serial.println(F("Отправлено!")); в вашем коде Arduino используется объект Serial и макрос F() для печати сообщения «Отправлено!» на последовательный монитор, указывая на успешную операцию отправки SMS.

```
}
```

**gusIsSend\_Bef = 1;** - Стока gusIsSend\_Bef = 1; в вашем коде Arduino присваивает значение 1 (true) переменной с именем gusIsSend\_Bef.

```
}
```

**smsSend = 0;** - Стока smsSend = 0; в вашем коде Arduino, скорее всего, присваивается значение 0 (ложь) переменной с именем smsSend.

**delay(1000);** - В строке используется функция задержки(), встроенная функция Arduino.

```
}
```

**else** - Оператор else в вашем коде Arduino представляет собой часть «else» условной структуры if...else.

```
{
```

**gusIsSend\_Bef = 0;** - Стока gusIsSend\_Bef = 0; в вашем коде Arduino присваивает значение 0 (ложь) переменной с именем gusIsSend\_Bef.

```
}
```

```
}
```

**short sRead\_Button ()** - Стока с коротким номером sRead\_Button() в вашем коде Arduino, скорее всего, определяет функцию с именем sRead\_Button, которая возвращает короткое целочисленное значение.

```
{
```

**short sButton\_Value = 0;** - Короткая строка sButton\_Value = 0; в вашем коде Arduino объявляется переменная с именем sButton\_Value и присваивается ей начальное значение 0.

**sButton\_Value = digitalRead (BUTTON\_PIN);** - Эта строка напрямую считывает состояние кнопки, подключенной к плате Arduino, и присваивает значение переменной с именем sButton\_Value.

**return sButton\_Value;** - Стока возвращает sButton\_Value; в вашем коде Arduino, скорее всего, является частью функции, которая считывает состояние кнопки.

}

При помощи приведенных кодов и команд можно выполнять сложнейшие программные задачи.

### **3.6. Проверка работоспособности автоматизированной системы оценки надежности и безопасности**

При разработке автоматизированной системы оценки надежности и безопасности производили проверки всех электронных компонентов по отдельности. В том числе для настройки датчика переменного тока осуществили калибровки при помощи PETOM-61 (комплекс программно-технический измерительный).

На рис. 3.10 приводится предварительный вариант разработанной нами физической модели на макетной плате и платформе Arduino UNO. Как следует из рис. 3.10 и 3.11, через датчик переменного тока пропускается определенный ток, который регулируется программно-техническим комплексом PETOM-61. Протекание тока по первичной обмотке датчика переменного тока наводит ЭДС во вторичную обмотку, которая подключена соответствующим выводам ATmega328. Как известно, датчик переменного тока ZMCT103C не имеет первичной обмотки.

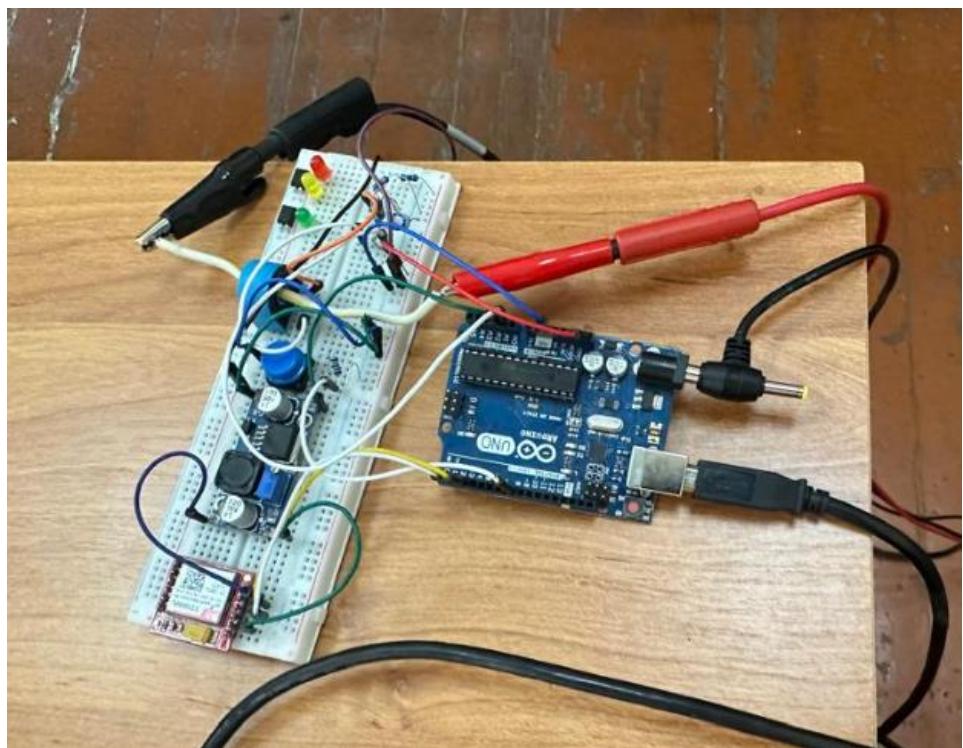


Рисунок 3.11 – Предварительный вариант физической модели в процессе калибровки

В этом случае провод, который проходит по отверстию датчика, считается как первичная его обмотка. При калибровке датчика переменного тока в качестве первичной обмотки нами был использован алюминиевый монтажный провод сечением 4  $\text{мм}^2$ .

На рис. 3.12 приводится предварительный вариант физической модели при калибровке датчика переменного тока ZMCT103C программно-техническим комплексом PETOM-61.

Программно-технический комплекс PETOM-61 имеет большие технические возможности. При помощи этого прибора можно осуществить регулирование электрического тока, изменение угла фаз напряжения, значение напряжения и частоты прибора. Прибор PETOM-61 в основном используется для проверки электромеханических, электронных и микропроцессорных реле защиты. Также, имитация любого вида короткого замыкания, скачок тока намагничивания, перенапряжение и других видов ненормальных режимов и повреждения электрооборудований.

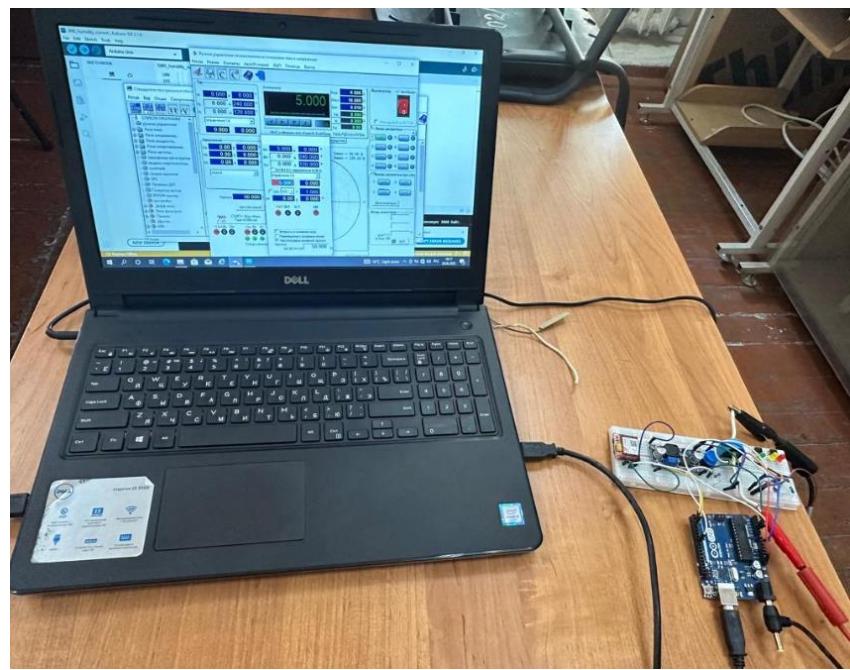


Рисунок 3.12 – Предварительный вариант физической модели в процессе калибровки

Учитывая технические возможности программно-технического комплекса PETOM-61, выбрали его для калибровки датчика переменного тока, которая подключается к программируемым микроконтроллерам. На рис. 3.13 показана схема подключения PETOM-61 к датчику переменного тока (для его калибровки).

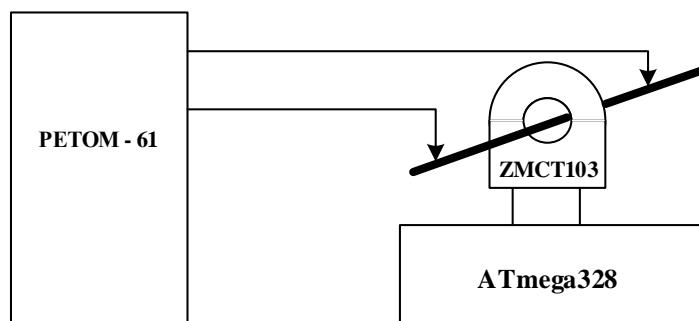


Рисунок 3.13 – Схема подключения PETOM-61 к датчику переменного тока ZMCT103C

При калибровке пропустили через первичную обмотку датчика ZMCT103C разное значение тока (максимальное значение было принято 5A) и получили соответствующие цифровые коды в программе Arduino UNO (Arduino 1.8.15).

Например, для тока 5A получили цифровой код 1E0E1B2C19, соответственно для других значений измеряемых токов получили различные цифровые коды, которые приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Шаг изменения токов, протекающих по первичной обмотке ZMCT103C, и их цифровые коды в программе Arduino 1.8.15

| №<br>п/п | Значения<br>тока, А | Цифровой код | Значения<br>тока, А | Цифровой код |
|----------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|
| 1.       | 0,1                 | 190E1B2C1A   | 3,1                 | 1C0E1B2C1A   |
| 2.       | 0,2                 | 190E1B2C1B   | 3,2                 | 1C0E1B2C1B   |
| 3.       | 0,3                 | 190E1B2C1C   | 3,3                 | 1C0E1B2C1C   |
| 4.       | 0,4                 | 190E1B2C1D   | 3,4                 | 1C0E1B2C1D   |
| 5.       | 0,5                 | 190E1B2C1E   | 3,5                 | 1C0E1B2C1E   |
| 6.       | 0,6                 | 190E1B2C1F   | 3,6                 | 1C0E1B2C1F   |
| 7.       | 0,7                 | 190E1B2C20   | 3,7                 | 1C0E1B2C20   |
| 8.       | 0,8                 | 190E1B2C21   | 3,8                 | 1C0E1B2C21   |
| 9.       | 0,9                 | 190E1B2C22   | 3,9                 | 1C0E1B2C22   |
| 10.      | 1,0                 | 1A0E1B2C19   | 4,0                 | 1D0E1B2C19   |
| 11.      | 1,1                 | 1A0E1B2C1A   | 4,1                 | 1D0E1B2C1A   |
| 12.      | 1,2                 | 1A0E1B2C1B   |                     |              |
| 13.      | 1,3                 | 1A0E1B2C1C   | 4,2                 | 1D0E1B2C1A   |
| 14.      | 1,4                 | 1A0E1B2C1D   |                     |              |
| 15.      | 1,5                 | 1A0E1B2C1E   | 4,3                 | 1D0E1B2C1C   |
| 16.      | 1,6                 | 1A0E1B2C1F   |                     |              |
| 17.      | 1,7                 | 1A0E1B2C20   | 4,4                 | 1D0E1B2C1D   |
| 18.      | 1,8                 | 1A0E1B2C21   |                     |              |
| 19.      | 1,9                 | 1A0E1B2C22   | 4,5                 | 1D0E1B2C1D   |
| 20.      | 2,0                 | 1B0E1B2C19   |                     |              |
| 21.      | 2,1                 | 1B0E1B2C1A   | 4,6                 | 1D0E1B2C1F   |
| 22.      | 2,2                 | 1B0E1B2C1B   |                     |              |
| 23.      | 2,3                 | 1B0E1B2C1C   | 4,7                 | 1D0E1B2C20   |
| 24.      | 2,4                 | 1B0E1B2C1D   |                     |              |
| 25.      | 2,5                 | 1B0E1B2C1E   | 4,8                 | 1D0E1B2C21   |
| 26.      | 2,6                 | 1B0E1B2C1F   |                     |              |
| 27.      | 2,7                 | 1B0E1B2C20   | 4,9                 | 1D0E1B2C22   |
| 28.      | 2,8                 | 1B0E1B2C21   |                     |              |
| 29.      | 2,9                 | 1B0E1B2C22   | 5,0                 | 1E0E1B2C19   |
| 30.      | 3,0                 | 1C0E1B2C19   |                     |              |

Таким образом, были сгенерированы цифровые коды для датчика переменного тока. Для емкостного датчика влажности грунта в «Библиотека» компьютерной программы Arduino 1.8.15 существуют специальные алгоритмы, которые обеспечивают надежность работы и минимальную погрешность разрабатываемого устройства при измерениях.

Также, после программирования была осуществлена проверка автоматизированной системы в реальных условиях. Результаты измерения в виде СМС приводятся в Приложении Д.

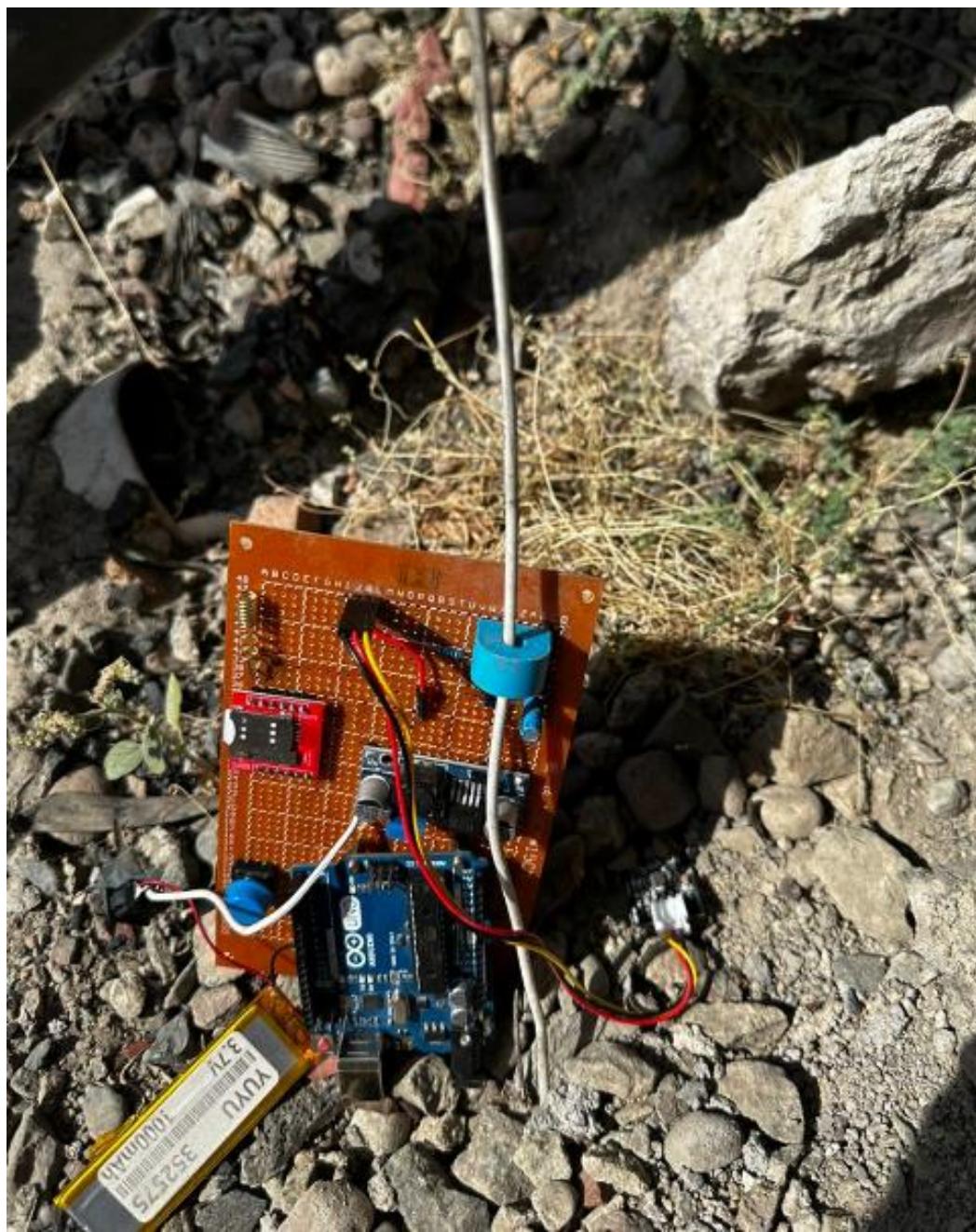


Рисунок 3.14 – Проверка физической модели в реальных условиях

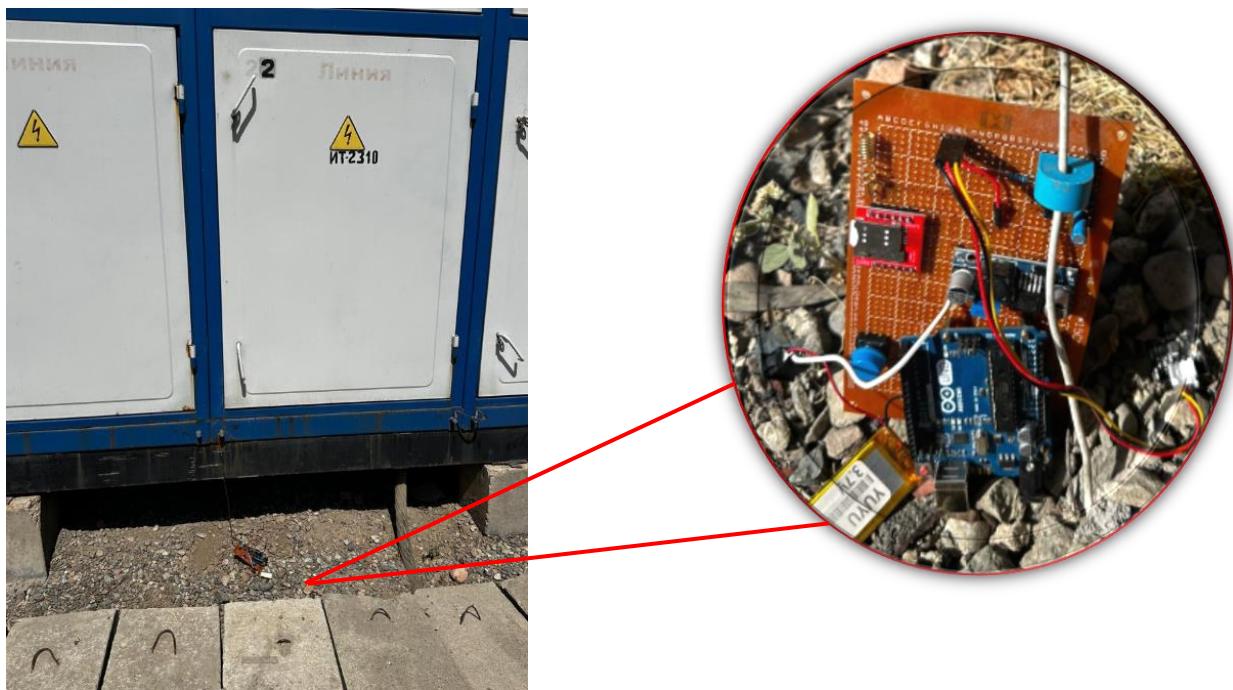


Рисунок 3.15 – Проверка физической модели в реальных условиях

На рисунках 3.14 – 3.15 приводится фото подключения физической модели автоматизированной системы к заземляющим проводникам комплектного распределительного устройства напряжением 10 кВ. Для измерения влажности грунта электрод емкостного датчика был погружен в грунт (над заземлителем). Необходимо отметить, что на работу физической модели может повлиять режим работы электроустановки, который получает питание от соответствующих ячеек подстанции.

Как известно, влажность грунта всегда зависит от климатических условий окружающей среды, и в течение суток ее значение постоянно меняется.

Необходимо отметить, что при разработке физической модели автоматизированной системы были использованы различные электронные компоненты, микроконтроллеры и программные обеспечения. Однако каждый элемент или компьютерные программы имеют свои особенности.

С целью упрощения схемы, алгоритмов программирования и эксплуатации разрабатываемого устройства нами были использованы компьютерные программы Proteus и Arduino 1.8.15, при которых были выполнены все поставленные задачи. Следовательно, после калибровки и программирования

микроконтроллеров была осуществлена проверка разрабатываемого устройства в виртуальной и реальной среде.

### 3.7. Оценка вероятности повышения показателей надежности электрооборудования и безопасности обслуживания

Как отмечается выше для оценки показателей надежности электрооборудовании и безопасности обслуживающих персоналов существует множество методов и методик. При этом во всех методах требуется использование возможных показателей, существенно влияющих на результат расчетов.

В качестве основных показателей, влияющих на надежность и безопасность, выбираются элементы, которые влияют на нормальный режим работы электрооборудования (защита от однофазного замыкания на землю), систему контроля изоляции, разработанную систему оценки надежности и безопасности и ухудшение состояния ЗУ.



Рисунок 3.16 – Взаимосвязь элементов, обеспечивающих надежность и безопасность обслуживания электрооборудований

В этой части работы рассматриваем оценку показателей надежности и безопасности при наличии или отсутствии автоматизированной системы.

На рисунке 3.16 приводится взаимосвязь элементов, обеспечивающих надежность и безопасность электрооборудований. Для оценки показателей надежности и безопасности воспользуемся логико-вероятностным методом [91, 94, 97].

В рамках диссертационной работы рассматривается оценка вероятности повышения показателей надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания при применении разработанной нами автоматизированной системы, с помощью логико-вероятностного метода, математическая сущность которого подробно приводится в работах [34, 52, 73, 94].

Для решения данного вопроса приводим вероятности отказа всех указанных событий, который существенно влияют на надежность электрооборудования и безопасность его обслуживания.

### ***Оценка показателей надежности электрооборудования***

Рассмотрим основное содержание событий в логико-вероятностной модели для оценки показателей надежности. Основными структурными элементами модели являются наличие напряжение в электрооборудовании, неисправность заземляющих устройств и отказ автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования.

В табл. 3.2. приведены значения вероятности отказа результаты статистических исследований события [34, 52, 94].

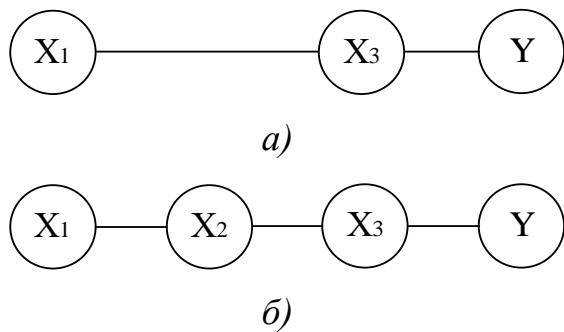


Рисунок 3.17 – Структурная схема изменения показателя надежности без применения *а*) и с применением *б*) автоматизированной системы

Таблица 3.2. Содержание событий, образующих логико-вероятностные модели.

| №<br>п/п | Элемент<br>структурь | Событие   |
|----------|----------------------|---|
| 1.       | $X_1$                | Наличие напряжения в электрооборудовании  |
| 2.       | $X_2$                | Отказ автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования |
| 3.       | $X_3$                | Неисправность заземляющих устройств   |
| 4.       | $Y$                  | Ухудшение показателей надежности  |

При отсутствии автоматизированной системы оценки надежности и безопасности вероятность изменения показателей надежности определяют следующим образом (рис. 3.17 *a*):

$$P(X_1, X_3) = P(X_1) \cdot P(X_3). \quad (3.1)$$

При наличии автоматизированной системы оценки надежности и безопасности (рис. 3.17 *б*):

$$P(X_1 \dots X_3) = P(X_1) \cdot P(X_2) \cdot P(X_3). \quad (3.2)$$

Следовательно, оценка надежности при наличии и отсутствии автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования определяется соотношением согласно [98]:

$$n = \frac{P(X_1) \cdot P(X_3)}{P(X_1) \cdot P(X_2) \cdot P(X_3)} = \frac{1}{P(X_2)}. \quad (3.3)$$

Среднее значение вероятности отказа событий определяется по выражению:

$$P_{CP} = \int_0^{T_3} P(t) \cdot dt = \frac{T_3 + \frac{1}{\lambda} (e^{-\lambda \cdot T_3} - 1)}{T_3} = 1 + \frac{e^{-\lambda \cdot T_3} - 1}{\lambda \cdot T_3}. \quad (3.4)$$

Для оценки надежности производим расчет по отказу электрооборудования и из-за неисправности заземляющих устройств. Согласно [94] вероятность отказа системы контроля отказа ЗУ  $P = 0,23$  (при отказе ЗУ).

$$n = \frac{1}{P(X_2)} = \frac{1}{0,23} = 4,34.$$

Следовательно, при отказе заземляющих устройств надежность электрооборудования ухудшается в 4,34 раза.

### ***Повышение безопасности обслуживающих персоналов при внедрении автоматизированной системы***

Для оценки электробезопасности обслуживающих персоналов воспользуемся логико-вероятностным методом. При этом учитываем все факторы, влияющие на надежность, и в качестве откликов принимаем «Электроопасную ситуацию при неисправности заземляющих устройств и при наличии и отсутствии автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования».

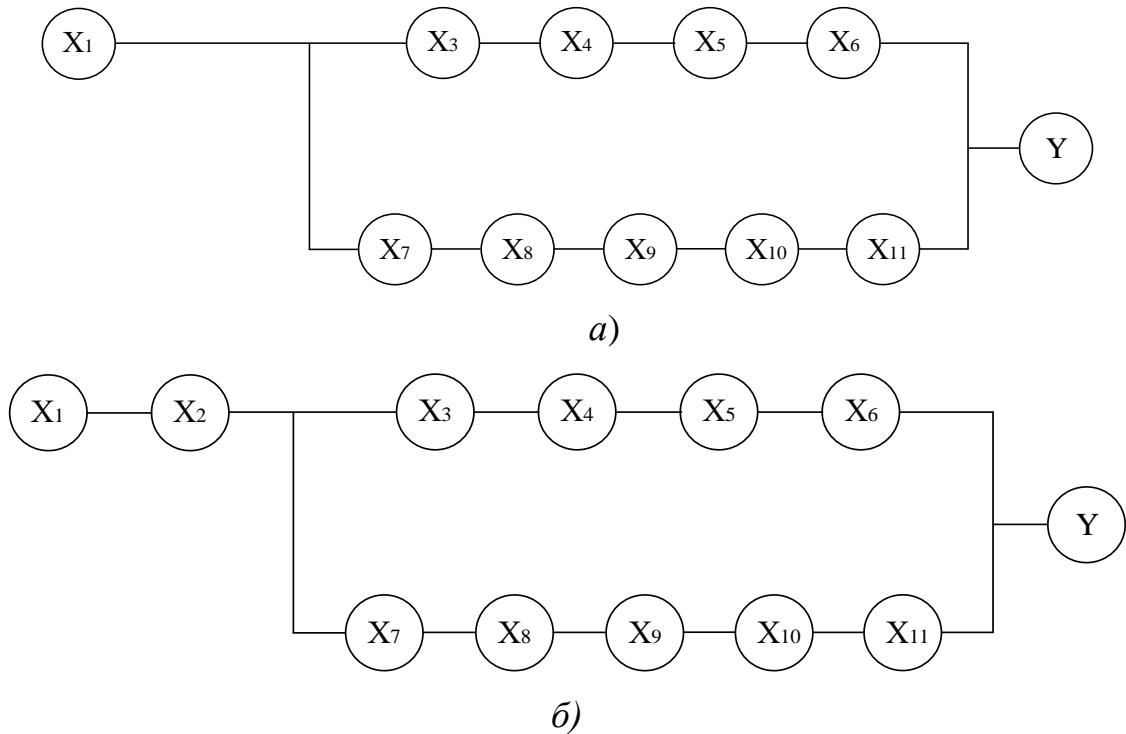


Рисунок 3.18 – Структурная схема возникновения электропоражения без применения (а) и с применением (б) автоматизированной системы

В таблице 3.3 приводим содержание событий, образующих логико-вероятностные модели, в число которых входит 11 сбитых ( $X_1 \dots X_{11}$ ) и один отклик ( $Y$ ).

Таблица 3.3 – Содержание событий, образующих логико-вероятностные модели

| №<br>п/п | Элемент<br>структуры | Событие   |
|----------|----------------------|---|
| 1.       | $X_1$                | Наличие напряжения в электрооборудовании  |
| 2.       | $X_2$                | Отказ автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования |
| 3.       | $X_3$                | Отказ системы контроля изоляции   |
| 4.       | $X_4$                | Возникновение однофазного замыкания на землю  |
| 5.       | $X_5$                | Неисправность заземляющих устройств   |
| 6.       | $X_6$                | Отказ защиты от однофазного замыкания на землю  |
| 7.       | $X_7$                | Прикосновение человека к металлической нетоковедущей части электрооборудовании        |

Окончание табл. 3.3

|     |          |  |
|-----|----------|--|
| 8.  | $X_8$    | Возникновение двойного замыкания на землю  |
| 9.  | $X_9$    | Отказ первой ступени защиты от однофазного замыкания на землю  |
| 10. | $X_{10}$ | Отказ второй ступени защиты от однофазного замыкания на землю  |
| 11. | $X_{11}$ | Возникновение шаговой напряжения   |
| 12. | $Y$      | Электроопасная ситуация при неисправности заземляющих устройств и при наличии и отсутствии автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования |

При отсутствии автоматизированной системы оценки надежности и безопасности показатели безопасности определяют уравнению 3.5 (рис. 3.18 *а*).

$$P(X_1, X_3 \dots X_{11}) = P(X_1) \cdot P(X_3) \cdot P(X_4) \cdot P(X_5) \cdot P(X_6) \cdot P(X_7) \cdot P(X_8) \cdot P(X_9) \cdot P(X_{10}) \cdot P(X_{11}); \quad (3.5)$$

При наличии автоматизированной системы оценки надежности и безопасности (рис. 3.18 *б*).

$$P(X_1 \dots X_{11}) = P(X_1) \cdot P(X_2) \cdot P(X_3) \cdot P(X_4) \cdot P(X_5) \cdot P(X_6) \cdot P(X_7) \cdot P(X_8) \cdot P(X_9) \cdot P(X_{10}) \cdot P(X_{11}); \quad (3.6)$$

Следовательно, оценка возникновения электроопасной ситуации при наличии и отсутствии автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования определяется соотношением согласно [94]:

$$n = \frac{P(X_1) \cdot P(X_3) \cdot P(X_4) \cdot P(X_5) \cdot P(X_6) \cdot P(X_7) \cdot P(X_8) \cdot P(X_9) \cdot P(X_{10}) \cdot P(X_{11})}{P(X_1) \cdot P(X_2) \cdot P(X_3) \cdot P(X_4) \cdot P(X_5) \cdot P(X_6) \cdot P(X_7) \cdot P(X_8) \cdot P(X_9) \cdot P(X_{10}) \cdot P(X_{11})} = \frac{1}{P(X_2)}$$

Вероятность отказа автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования была определена  $\lambda t = 0,2048$  по [98]. Затем вероятность события  $P(X_2)$  определяем по выражению (1.7).

Среднее значение вероятности отказа разработанной автоматизированной системы определяется по (3.4):

$$P_{CP} = 1 + \frac{e^{-\lambda \cdot T_3} - 1}{\lambda \cdot T_3} = 0,096.$$

Следовательно, вероятность повышения безопасности обслуживающих персоналов оценивают по выражению:

$$n = \frac{1}{P(X_2)} = \frac{1}{0,096} = 10,4.$$

Таким образом, при применении автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования вероятность улучшения электробезопасности возрастает.

### **3.8. Разработка инструкции по эксплуатации автоматизированной системы**

Инструкция по эксплуатации устройства разрабатывается с целью дальнейшей ее эксплуатации и обслуживания, в которой описывают принципиальную электрическую схему, структурную схему и программное обеспечение. В каждой инструкции по эксплуатации устройства должна описываться информация об устройстве, его технические характеристики и правила электробезопасности при эксплуатации.

Подключение устройства для проверки состояния элементов заземлителя к заземляющему проводу и источнику питания требуется при соблюдении требований «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок».

Подключение устройства производят следующим образом:

- подключают датчик переменного тока к заземляющему проводнику, через трансформатор тока;
- погружают датчик влажности грунта в месте нахождения заземлителя;
- подключают блок питания устройства к источнику переменного оперативного тока;
- нажатием кнопки «Питание» запускают устройство для проверки состояния элементов заземлителя.

На рисунке 3.19 приводится схема подключения датчика влажности грунта и датчика переменного тока к элементу ЗУ.

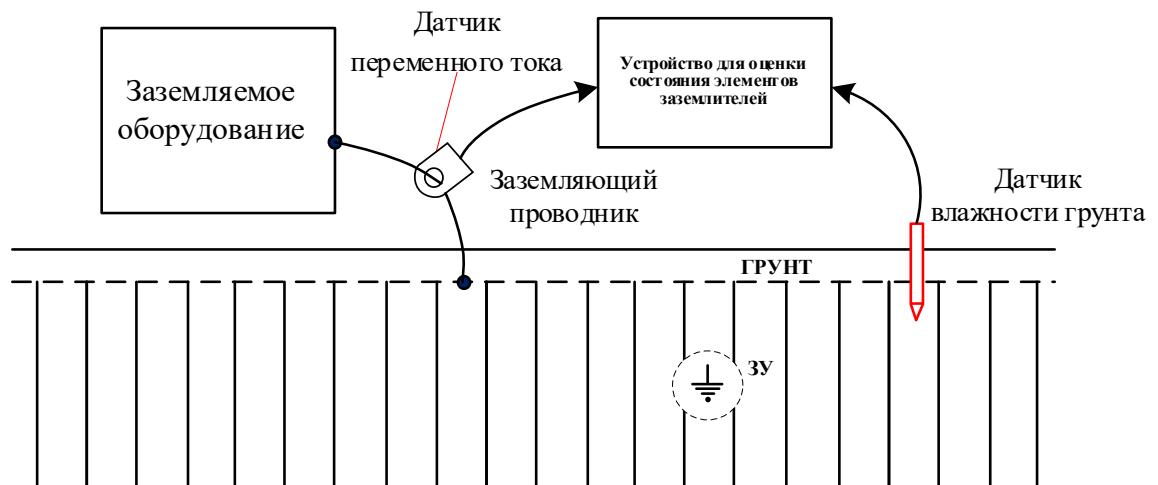


Рисунок 3.19 – Схема подключения устройства для проверки элементов ЗУ

При полном подключении устройства происходит постоянное измерение влажности грунта и токов, протекающих по заземлителям, значение которых через заданное время отправляется посредством СМС-сообщения на любой телекоммуникационной системе. Номер получателя задается при программировании микроконтроллера ATmega328 (параграф 3.5).

При подключении автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования к элементам заземляющих устройств рекомендуется соблюдать требования действующих правил техники безопасности [84, 85].

Основанием для подключения данной системы при мониторинге параметров элементов заземлителя является утвержденная программа измерений.

Сборка схема подключения автоматизированной системы приводится с разрешения производителя работ. Подключение блока питания к источнику оперативного тока и датчиков переменного тока и влажности грунта к соответствующим элементам выполняется оперативным персоналом по команде производителя работ.

Следует отметить, что при измерениях любой физической величины пропускают погрешность, которая зависит от класса точности измерительных приборов, характера изменения измеряемых параметров и других факторов.

Согласно [105] при оценке состояния элементов ЗУ погрешность измерения зависит от характера изменения влажности грунта, максимальное значение которой достигается до 18,13% (таб. 1.2).

Таким образом, при оценке состояния элементов заземлителя максимальная погрешность составляет  $18,13+0,2+0,2\%$  (погрешность датчика влажности грунта и датчика переменного тока). Считаем, усовершенствованное разработанное нами устройство и метод проверки состояния элементов заземлителя являются актуальной научно-технической задачей.

### 3.9. Выводы

1. При учете основных параметров и характеристик электронных компонентов нами была разработана принципиальная электрическая схема автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования.
2. На основание разработанной принципиальной схемы подготовлена компьютерная модель и осуществлена виртуальная проверка соответствующих электронных компонентов.
3. Разработан прототип автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования и его программное обеспечение.
4. Внедрение в практику разработанной нами автоматизированной системы обеспечивает вероятность повышения надежности электрооборудования и безопасности обслуживающих персоналов соответственно – 4,34 и 10,4 раза.
5. Разработана инструкция по эксплуатации автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, направленная на разработку автоматизированной системы оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя.

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты:

1. Проведен анализ факторов, влияющих на показатели надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания и обоснованы их взаимосвязь с ЗУ. Также рассмотрены действующие методы оценки надежности и безопасности электрооборудования.

2. Разработана принципиальная электрическая схема автоматизированной системы оценки надежности и безопасности электрооборудования при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя, в которой указывается последовательность действия электронных компонентов с микроконтроллером.

3. Разработана автоматизированная система, которая позволяет при постоянном мониторинге состояния элементов заземлителя оценивать показатели надежности электрооборудования и уровень безопасности обслуживающих персоналов [6-А].

4. Разработана компьютерная модель автоматизированной системы и ее программное обеспечение [7-А].

5. Применение разработанной нами методики обеспечивает вероятность повышения надежности электрооборудования и безопасности обслуживающего персонала соответственно в 4,34 и 10,4 раза.

6. Результаты исследования используются в процессе изучения студентами ТТУ им. акад. М.С. Осими дисциплин «Энергетическая электроника», «Элементы автоматических устройств», «Электробезопасность» и «Основа микропроцессорной техники» и ОАО «Барки Точик».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдуллоев, Р.Т. Факторы, влияющие на коррозию заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // Материалы LIV международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. докт. техн. наук П.Г. Свечникова. – Челябинск: ЧГАА, 2015. – Ч. IV. – С. 93 – 96.
2. Абдуллоев, Р.Т. Физическое моделирование элементов заземлителей при учете электромагнитных процессов / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – С. 467 – 473.
3. Абдуллоев, Р.Т. Планирование эксперимента по исследованию влияния внешних факторов на техническое состояние заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // Электробезопасность. 2015. №2. С. 38 – 42.
4. Абдуллоев, Р.Т. Экспериментальное исследование влияния ближайших токов на процесс коррозии заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев // Сборник тезисов докладов участников XVII отраслевой научно-технической конференции молодых руководителей и специалистов: Секция «Основное производство» Екатеринбург: 2016. С. 15 – 16.
5. Абдуллоев, Р.Т. Прогнозирование коррозионного состояния заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, Н.И. Горбунов // Электробезопасность. 2016. №2. С. 36 – 43.
6. Абдуллоев, Р.Т. Анализ существующих методов определения состояния элементов заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // Наука ЮУрГУ: материалы 68-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 358 – 363.

7. Абдуллоев, Р.Т. Исследование процесса коррозии заземляющего устройства / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // Наука ЮУрГУ: материалы 68-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 354 – 358.
8. Авдеева, К.В. Программа расчета параметров заземляющего устройства / К.В. Авдеева // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всерос. науч. конф. молодых ученых / Новосибирский гос. техн. ун-т. Новосибирск, 2006. С. 174–176.
9. Андреев, Д.А. Совершенствование методов расчета эксплуатационной надежности электрооборудования электростанций и подстанций // дис... канд. техн... наук: 05.14.02 / Д.А. Андреев, – Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2006–240 с.
10. Анисимов, А. Новый GSM-модуль Neoway M660A / А. Анисимов // Беспроводные технологии. – 2015. – № 1. – С. 22–24.
11. Анисимов, А. GSM-модули Neoway: рекомендации по применению / А. Анисимов // Беспроводные технологии. – 2014. – № 1. – С. 12–16.
12. Арзамасцев, Д.А. Обоскалов В.П. Расчет показателей структурной надежности энергосистем: учебное пособие / Д.А. Арзамасцев, В.П. Обоскалов. – Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М. Кирова, 1986. – 80 с.
13. Базовский, И. Надежность. Теория и практика: Пер. с англ. Ю.Г. Епишина; под ред. Б.Р. Левина. -М.: Изд-во "Мир", 1965. – 378 с.
14. Банько, И.С. Об эффективности максимальной токовой защиты ВЛ 6, 10 кВ сельского электроснабжения / И.С. Банько // Электрические станции. 1973, №3. – С. 68 – 75.
15. Батуев, Б. Начало работы с технологией интеграции пользовательского ПО в GSM/GPRS-модуль SIM800/SIM800H / Б. Батуев // Беспроводные технологии. 2014. № 3. – С. 33 – 41.
16. Бахтиаров, Г.Д. Состояние техники и перспективы развития быстродействующих АЦП / Г.Д. Бахтиаров, П.А. Дзарданов // ПТЭ, 1982, № 6, – С. 5 – 20.

17. Биллинтон Р., Аллан Р. Оценка надежности электроэнергетических систем: учебное пособие пер. с англ. / Р. Биллинтон, Р. Аллан. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
18. Бонч-Бруевич, М.М. Использование интервала доступа для управления распределением трафика в области локальной перегрузки сети GSM// «Т-Comm Телекоммуникации и Транспорт» 2010 г. № 2. – С. 16 – 22.
19. Борисов, Р.К. Измерительные средства для диагностики заземляющих устройств / Р.К. Борисов, С.А. Кокорин // Третья российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов / Сибирская энергетическая академия. Новосибирск, 2008. – С. 137 – 146.
20. Бургсдорф, В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
21. Валов, А.В. Микропроцессоры и их применение в системах управления: Учебное пособие / А.В. Валов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – Ч.2. – 81 с.
22. Валов, А.В. Микропроцессоры и их применение в системах управления: Учебное пособие / А.В. Валов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – Ч.3. – 58 с.
23. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебное пособие / В.А. Веников. – М.: Высшая школа. 1976. – 479 с.
24. Веников, В.И. Физическое моделирование электрических систем / В.И. Веников, А.В. Иванов – Смоленский. – М.: Государственное энергетическое издательство. 1956. – 359 с.
25. Веялис, Б.С. К вопросу о кратностях токов короткого замыкания на линиях 6, 10 кВ сельскохозяйственного электроснабжения / Б.С. Веялис, И.С. Банько // Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей: научн. тр./ Волгоградский СХИ, т. XXXIV. Волгоград, 1970. – 136 с.

26. Воронина, А.А. Напряжение прикосновения и потенциал сложных заземлителей в однородной земле / А.А. Воронина // Электричество. 1969. №7. – С. 52 – 56.
27. Воронина, А.А. Сопротивление растеканию сложных заземлителей и напряжение прикосновения сложных заземлителей в двухслойной земле / А.А. Воронина // Электричество. 1969: № 8. – С. 43 – 47.
28. Гайфулина, Д.А. Методика лексической разметки структурированных бинарных данных сетевого трафика для задач анализа протоколов в условиях неопределенности / Д.А. Гайфулина, И.В. Котенко, А.В. Федорченко // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. – С. 280 – 299.
29. Гамм, А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем / А.З. Гамм. – М.: Наука, 1976. – 200 с.
30. Галушко, В.Н. Надежность электроустановок и энергетических систем: учеб. - метод. пособие / В.Н. Галушко, С.Г. Додолев; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2014. – 154 с.
31. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 23 с.
32. ГОСТ Р 50571.21-2000 (МЭК 60364-5-548-96). Заземляющие устройства и системы уравнивания электрических потенциалов в электроустановках, содержащих оборудование обработки информации, 1990. – 86 с.
33. ГОСТ Р 50571.22, 2000 Заземление оборудования обработки информации (IEC 60364-7-707, 1984) М.: ИПК Изд-во стандартов. 2000.–12 с.
34. Гук, Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю.Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
35. Денисенко, В. Заземление в системах промышленной автоматизации // Современные технологии автоматизации. - 2006. - № 2. - С. 95 – 99.

36. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учебное пособие для вузов. – 2 – е изд., перераб. и доп. / П.А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984.– 448 с.
37. Дулицкий, Г.А. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок напряжением до 1000 В / Г.А. Дулицкий, А.П. Комаревцев. – М.: Воениздат, 1988.–128 с.
38. Евстифеев, А.В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL, 5-е изд., стер. / А.В. Евстифеев. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 560 с.
39. Евстифеев, А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Classic фирмы ATMEL – 3-е изд., стер. / А.В. Евстифеев. – М.: Издательский дом «Додэка\_XXI», 2006. – 288 с.
40. Елисеев, Н. GSM-модули: области применения и производители / Н. Елисеев, // ЭЛЕКТРОНИКА: наука, технология, бизнес. – 2012. – №7. – С. 50–59.
41. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. / Г.С. Зиновьев // Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2000. Ч. 2. 197 с.
42. Измеритель сопротивления заземления и петли фаз-ноль С.А 6454, С.А 6456, С.А 6460, С.А 6462 и С.А 6470 / Методика проверки. – ГЦИ СИ ФГУП “ВНИИМС”, М.: 2006. – 12 с.
43. Измерители напряжения прикосновения и параметров устройств дифференциального тока MRP-201 / Руководство по эксплуатации. – ООО «СОНЭЛ», М.: 2024. – 34 с.
44. Измерители параметров заземляющих устройств MRU-200 MRU-200 GPS / Руководство по эксплуатации. – ООО «СОНЭЛ», М.: 2024.– 46 с.
45. Измерительный преобразователь сигналов емкостных датчиков. Пат. 1827029 А3 СССР, МКИ3 G 01 R 27/26.
46. Карякин, Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник второе изд. / Р.Н. Карякин. – М.: Энергосервис 2006.– 518 с.
47. Карякин, Р.Н. Нормы устройства сетей заземлений / Р.Н. Карякин. – М.: Энергосервис, 2002.– 234 с.

48. Касперович А.Н., Шалагинов Ю.В. Некоторые вопросы проектирования АЦП с использованием амплитудной свертки сигнала / А.Н. Касперович, Ю.В. Шалагинов // Автометрия, 1978, № 4, – С. 50 – 58.
49. Кетков, Ю.Л. Практика программирования: Бейсик, Си, Паскаль / Ю.Л. Кетков, А.Ю. Кетков // Самоучитель. СПб.: ВБХ-Петербург, 2001. – 480 с.
50. Князевский, Б.А. Охрана труда в электроустановках: учебник для вузов 3-е изд., перераб. и доп. / Б.А. Князевский. – М.: Энергоатомиздат, 1983.– 336 с.
51. Королькова, В.И. Электробезопасность на промышленных предприятиях: учебник / Королькова, В.И. – М., «Машиностроение», 1970.–522 с.
52. Китушин, В.Г. Надежность энергетических систем / В.Г. Китушин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 256 с.
53. Кострик, А.Г. Практика определения технического состояния внутреннего контура заземления зданий и сооружений на энергообъектах / А.Г. Кострик, Б.Ф. Крымский // Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов - Новосибирск: Издательство МОО "Сибирская энергетическая академия", 2002. – С. 193-200.
54. Кострик, А.Г. Повышение уровня надежности, электробезопасности и электромагнитной совместимости при вводе современных ТЭС с ГТУ и АЭС // дис... канд. техн... наук: 05.26.01 / А.Г. Кострик, – Москва: МЭИ (НИУ), 2007 – 184 с.
55. Коструба, С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств / С.И. Коструба. – М.: Энергоатомиздат, 1987.– 400 с.
56. Коструба, С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств: учебное пособие / С.И. Коструба. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
57. Крикун, И.В. Испытания заземляющих и зануляющих устройств электроустановок / И.В. Крикун. – М.: Энергия, 1973. – 81с.

58. Колосков, В.А. Архитектура отказоустойчивых сетей самонастраиваемых микроконтроллеров / В.А. Колосков, В.С. Титов. – Курск: КГТУ, 1995. – 176 с.
59. Колосков, В.А. Методы самоорганизации отказоустойчивой мульти микроконтроллерной сети / В.А. Колосков, В.С. Титов // Автоматика и телемеханика. –1998. – №3. – С. 173 – 183.
60. Колосков, В.А. Саморемонт и самосинхронизация логических микроконтроллерных сетей / В.А. Колосков, Т.П. Колоскова, В.С. Титов // Изв. вузов. Приборостроение. –1997. – № 2. – С. 43 – 46.
61. Колосков, В.А. Метод восстановления логической структуры мульти микроконтроллерной сети / В.А. Колосков // Изв. КурскГТУ. – 1997. – № 1. – С. 82 – 89.
62. Колосков, В.А. Маршрутизация сообщений в отказоустойчивой микроконтроллерной сети вибрационного стенда / В.А. Колосков, Л.М. Миневич // Вибрационные машины и технологии. Сб. докл. III Международной научно-технической конференции. – Курск: КГТУ, 1997. – С. 245 – 249.
63. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. –М.: Энергия, 1971. 152 с.
64. Манойлов, В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. Манойлов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отделение, 1991.– 480 с.
65. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок / РД-153-34.0-20.525-00. – М: СПО ОРГРЭС, 2000.– 64 с.
66. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок / СТО 56947007 - 29.130.15.105-2011. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС» 2011.–75 с.
67. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. – М: НГТУ, МЭИ ТУ, НПФ ЭЛНАП и АО «Фирма ОРГРЭС», 2000.–54 с.

68. Микромиллиомметр ИКС-1А / Руководство по эксплуатации. – ООО «СОНЭЛ», М.: 2018.– 15 с.
69. Микроконтроллер ATmega328 фирмы ATMEL [Электронный ресурс].- Режим доступа: [http://www.tme.eu/ru/Document/6d79eabcce8cf414f04b\\_c5c389\\_ed3469/2466s.pdf](http://www.tme.eu/ru/Document/6d79eabcce8cf414f04b_c5c389_ed3469/2466s.pdf).
70. Молдованова, О.В. Языки программирования и методы трансляции Учебное пособие. / О.В. Молдованова– Новосибирск, СибГУТИ, 2012. – 134 с.
71. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т./ Под общей ред. Ю.Н. Руденко. Т.2. М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.
72. Назарычев, А.Н. Совершенствование системы ремонтов электрооборудования электростанций и подстанций с учетом технического состояния // дис... докт. техн... наук: 05.14.02 / А.Н. Назарычев – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2005 – 390 с.
73. Непомнящий, В.А. Надежность оборудования энергосистем учебник / В.А. Непомнящий. – М.: Изд-во журнала «Электроэнергия. Передача и распределение», 2013. – 196 с.
74. Обоскалов, В.П. Структурная надежность электроэнергетических систем: учебное пособие / В.П. Обоскалов. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 194 с.
75. Определение технического состояния заземляющих устройств Калининской АЭС. Технический отчет / ОАО «Южный ИЦЭ». - пер. X» 138. – Краснодар, 2005.
76. Орлов, П.С. Обеспечение безопасности и надежности электроснабжения инженерно-техническими мероприятиями / П.С. Орлов, В.С. Шкрабак, С.А. Бобков и др. // Аграрный научный журнал. 2019. №3. С. 78 – 83.
77. Орлов, С.А. Теория и практика языков программирования / С.А. Орлов // Учебник для вузов. Стандарт 3-го поколения. – СПб.: Питер, 2013. – 688 с.
78. Острайковский, В.А. Теория надежности: учебник для вузов / В.А. Острайковский. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.

79. Пат. 161812 Российская Федерация: МПК G01R 19/45 (2006.01). Установка для исследования влияния факторов окружающей среды и блюжающих токов на процесс коррозии заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын. – № 2015145568/28; заявл. 22. 10. 2015; опубл. 28. 03. 2016, Бюл. №13-2016.-2.
80. Пат. 2649630 Российская Федерация: МПК G01RB 17/00 (2006.01). Способ определения коррозионного состояния заземляющих устройств/ Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, Н.И. Горбунов, И.А. Шеремета. – № 2017103850; заявл. 06.02.2017; опубл. 04. 04. 2018, Бюл. № 10-2018.
81. Пирс, Б. Типы в языках программирования / Пирс Б. // Перевод с англ. М.: Издательство «Лямбда пресс»: «Добросвет», 2011. – 656 с.
82. Подключение энкодера KY-040 к Arduino [Электронный ресурс] / RobotChip. URL: <https://robotchip.ru/podklyuchenie-enkodera-ky-040-k-arduino/>
83. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. 2-е изд., перераб. и доп. / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
84. Правила технической безопасности при эксплуатации электроустановок. – М.: Энергия, 1981. – 160 с.
85. Правила устройств электроустановок: ПУЭ -6 (по состоянию на 1 мая 2005 года). – Новосибирск: Сибирское издательство, 2005. – 511 с.
86. Прозоров, Ю.П. Выбор структуры АЦП / Ю.П. Прозоров, Ю.В. Полубабкин / Цифровая информационно-измерительная техника. Межвуз. сб. научн. тр.: Пенза, Пенз. политехн. ин-т, 1980, – С. 23 – 27.
87. Пучков, Г.Г. Математическая модель заземляющего устройства переменного тока / Г.Г. Пучков // Электричество. 1984. № 3. – С. 25 30.
88. Работа с датчиками тока на эффекте Холла: ACS758 [Электронный ресурс], -<https://habr.com/post/397641>, - статья в интернете. - 15.09.2016 amperka / dht [Electron, resources] // (<https://github.com/amperka/dht: on the base on http://sheepdogguides.com/arduino/ar3nelhumDHT11.htm>, optimization and few fixes by Amperka Team <http://amperka.ru>).

89. Раубаль, Е.В. Выбор систем заземления в сетях до 1 кВ / Е.В. Раубаль // Сборник материалов VII-ой Международной научно-практической интернет-конференции энерго- и ресурсосбережение XXI век. Под редакцией В.А. Голенкова, А.Н. Качанова, Ю.С. Степанова. 2009 Издательство: ООО Изд. дом "ОРЛИК и К" М.: 2009. С. 51 –56.
90. РД 34.35.310-97. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем. - М.: СПО ОРГРЭС, 1997. – 36 с.
91. Розанов, М.Н. Надежность энергетических систем / М.Н. Розанов, – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.
92. Руководство по применению встроенного стека протоколов TCP/IP GSM/GPRS-модулей серии SIM800SIM800. Series\_TCPIP\_Application Note\_V1.01.pdf.
93. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно- сложных систем / И.А. Рябинин. – Спб.: Политехника, 2000. – 248 с.
94. Рябинин, И.А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно - сложных систем / Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
95. Сами, М. Перестраиваемые архитектуры матричных процессорных СБИС / М. Сами, Р. Стефанелли // ТИИЭР, №5. – 1986. – С.107 – 118.
96. Сафонов, В.П. Новые методы построения быстродействующих АЦП. / В.П. Сафонов / ПСУ, 1979, № 8. – С.15 –18.
97. Сидоров, А.И. Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах // дис... докт. техн... наук: 05.26.01 / А.И. Сидоров – Челябинск: Челябинский государственный технический университет, 1993 – 433 с.
98. Сидоров, А.И. Повышение надежности сельских электрических сетей с помощью устройств компенсации токов однофазного замыкания на землю // дис... канд. техн... наук: 05.09.03 / А.И. Сидоров – Челябинск:

Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, 1984 – 171 с.

99. Сидоров, А.И. Основы электробезопасности: учебное пособие / А.И. Сидоров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001.– 344 с.
100. Сидоров, А.И. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения: монография / А.И. Сидоров, В.И. Петуров, А.В. Пичуев, И.Ф. Суворов. – Чита, ЧитГУ, 2009.–268 с.
101. Сидоров, А.И. О проблеме непрерывного контроля состояния заземляющего устройства / А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т. 1. С. 241–244.
102. Сидоров, А.И. Основы электробезопасности: учебное пособие / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская, Н.В. Глотова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2015. 223 с.
103. Сидоров, А.И. Обзор компьютерных моделей для анализа состояния заземляющих устройств / А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын, Р.Т. Абдуллоев // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов VI-й научно-практической конференции: в 2 т. / под. ред. А.И. Сидорова – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Т.1. С. 243 – 245.
104. Сидоров, А.И. Разработка плана отсеивающего эксперимента по исследованию влияния различных факторов на процесс коррозии заземляющих устройств / А.И. Сидоров, Р.Т. Абдуллоев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 52 – 58. DOI: 10.14529/power 160207.
105. Сидоров, А.И. Математическое моделирование процессов коррозии заземляющих устройств / А.И. Сидоров, Р.Т. Абдуллоев, Табаров Н.Х. // Материалы VIII-й научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования». – Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2016. – С. 100 – 103.
106. Сидоров, А.И. Диагностика состояния заземляющих устройств / Сидоров А.И., Абдуллоев Р.Т. // Материалы Всероссийской научно-технической

конференции. «Наука. Технология. Производство – 2016: Современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средства и систем автоматики» / под общ. ред. проф. М.Г. Баширов. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – С. 247 – 250.

107. Инструкция системы AT-команд GSM/GPRS-модулей серии SIM800. SIM800\_Series\_AT\_Command\_Manual\_V1.09.pdf.

108. Солдатов, А.И. Экспериментальное исследование влияния химических минералов грунта на процесс коррозии заземляющих устройств / А.И. Солдатов, Р.Т. Абдуллоев // Электробезопасность. 2016. №2. С. 44 – 50.

109. Тихвинский В.О., Терентьев С. В. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев. – М.: Эко-Трендз, 2007. – 400 с.

110. Хашковский, А.В. Надежность и безопасность технических систем: учебное пособие для выполнения курсовой работы / А.В. Хашковский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 68 с.

111. Хтун, Линн. Модель транспортного робота на основе микроконтроллера Arduino / Хтун Хтун Линн, Зо Зо Тун, Хейн Вай Зо // Микроэлектроника и информатика -2018. 25-я Всероссийская межвузовская научно-практическая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2018. –316 с.

112. Хузяшев, Р.Г. Разработка алгоритма функционирования канала GSM-связи топографического датчика / Р.Г. Хузяшев, И.Л. Кузьмин // Молодежь и наука: реальность и будущее: Материалы II Международной научно-практической конференции, том VIII, Невинномысск, 2009. – С. 52 – 55.

113. Хузяшев, Р.Г. Удаленное программирование микроконтроллерного датчика тока / Р.Г. Хузяшев, И.Л. Кузьмин // Материалы докладов IV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», 1 том, Казань, 2009. – С. 125 – 131.

114. Цапенко, Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ / Е.Ф. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – с. 128.

115. Целебровский, Ю.В. Особенности заземляющих устройств / Ю.В. Целебровскищ, Е.С. Колечицкий // Вторая Российская; конференция по; заземляющими устройствам – Энергетик. 2006. №2. С. 41 – 43.
116. Чекулаев, В.Е. Охрана труда и электробезопасность: учебник / В.Е.Чекулаев, Е.Н. Горожникона, В.В. Лепеха. – М.: ФГБОУ «Учебно – методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012.– 304 с.
117. Цимбалист, И.В. Новый метод обслуживания абонентов в сети мобильной связи GSM / Е.Ф. Цапенко // Инфосфера, 2001, №11, С. 27 – 30.
118. Шабад, М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ / М.А. Шабад. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007. – 64 с.
119. Шушпанов, И.Н. Разработка методов оценки надежности распределительной электрической сети и выбора мероприятий по её повышению // дис... кан. техн. наук: 05.14.02 / И.Н. Шушпанов, – Иркутск: ИрГТУ (НИУ), 2013 – 138 с.
120. Щуцкий, В.И. Режим функционирования устройств контроля непрерывности заземляющей сети / Электробезопасность. 1987. №2. С. 94 – 96.
121. Щуцкий, В.И. Надежность и безопасность электроснабжения подземных работ: справочное пособие / В.И. Щуцкий, М.И. Макаров, Э.Р. Осипов. – М.: Недра, 1994. – 225 с.
122. Якобе, А.И. Сезонные коэффициенты сопротивления сложных заземлителей / А.И. Якобе, М.Б. Алимамедов // Электричество. 1969. № 8. С. 47 – 51.
123. ARRL Inc., H Ward Silver. Grounding and Bonding for the Radio Amateur 2nd Edition – Good Practices for Electrical Safety, Lightning Protection, and RF Management. – “ARRL The National Association for Amateur Radio®”, 2021. 176 pages.
124. Arduino Mega 2560 [Электронный ресурс], - <http://doc.arduino.ua/ru/hardware/Mega2560>, - статья в интернете. -10.04.2015.

125. Arduino Uno [Электрон, ресурс] // (<http://amperka.rLi/collection/bestsellers/product/Arduino-Uno>). Arduino [Электрон, ресурс] // (<http://ru.wikipedia.org/wiki/Arduino>).
126. Arduino - ArduinoBoardUno [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno> DIY an Arduino-Powered Robotic Vacuum Cleaner. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.open-electronics.org/diy-an-arduino-powered-robotic-vacuum-cleaner/>.
127. Bellman R., Kalaba R. Dynamic programming and adaptive control processes: Mathematical foundations // IRE Trans. on Automatic Control. – 1960. – Vol. AC-5. – Pp. 5 – 10.
128. Burg A., Chattopadhyay A., Lam K.Y. Wireless communication and security issues for cyber-physical systems and the Internet-of-Things // Proceedings of the IEEE. 2017. vol. 106. no. 1. pp. 38 – 60.
129. Frank H., Hakimi S.L. Reliability and optimum design of the interconnections of a power system // IEEE transactions on power apparatus and system. 1966. - V. 85. - №12.-P. 1191-1195.
130. Gregory P. Bierals. Grounding Electrical Distribution Systems 1st Edition, Kindle Edition. – “River Publishers”, 2021. 158 pages.
131. Heising C.R. Summary of CIGRE 13-06 Working Group world wide reliability data, and studies on the worth of improved reliability of high voltage circuit-breakers. Ind. and commer. power system tech., conf New-York, 1986. NCH 2279 - 8/86. P. 93 – 111.
132. James A. McCall Stephen H. Hall GarretW. Hall. High-Speed Digital System Design – A Handbook of Interconnect Theory and Design Practices. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
133. Language Reference [Электрон. ресурс] // (<http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>) Freeduino2009 [Электрон, ресурс] // ([http://ireeduino.ru/arduino/ireeduino\\_2009.html](http://ireeduino.ru/arduino/ireeduino_2009.html)).
134. Levshun D., Chechulin A., Kotenko I., Chevalier Y. Design and Verification Methodology for Secure and Distributed Cyber-Physical Systems // 2019

10th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). 2019. pp. 1-5.

135. Lewis Blackburn, Thomas J. Domin. Protective Relaying: Principles and Applications, Fourth Edition 4th Edition. – “CRC Press”, 2014. 695 pages.

136. Michaca R., Heising C.R., Koppl G. Summary of CIGRE Working Group 13.06 Studies on the test and controls methods to assure the reliability of high voltage circuit-breakers //Electra. 1985. N 102. P. 133 – 175.

137. Miller J.S. Two-Dimensional Characteristics of HAL, A Language for Spaceflight Applications. - SIGPLAN Notices, 1972.

138. Phil Simmons, Mark C. Ode. Electrical Grounding and Bonding 7th edition – “Cengage Learning”, 2023. 432 pages.

139. Rajamani, K. Application guide for power engineers – part 1: Earthing and Grounding of Electrical Systems. - “Notion Press”, 2019. 357 pages.

140. Rombouts T., Kinnersley W. The Language List. Collected information on about 1225 computer languages, past and present, 1991.

141. Stanley H. Horowitz, Arun G. Phadke, Charles F. Henville. Power System Relaying 5th Edition. – “Wiley”, 2022. 528 pages.

142. Sunde E. D. Earth Conduction Effects in transmission Systems / E. D. Sunde. New York-Toronto, 1949. 373 p.

143. Zeljkovic C.V., Rajakovic N. Lj., Zubic S.J. Customer-Perspective Approach to Reliability Evaluation of Distributed Generation. IEEE Power Tech. Norway June 19-23, 2011.

#### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

*Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан и Российской Федерации:*

[1-А]. Сайфиддинзода, О.С. Исследование влияния состояния функционального заземления на устройство микропроцессорной релейной защиты / О.С. Сайфиддинзода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. №2 (58). 2022. С. 17 – 20.

[2-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** Программное обеспечение автоматизированной системы оценки надёжности и безопасности электроустановок / О.С. Сайфиддинзода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. №2 (66). 2024. С. 27– 31.

[3-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** Устройство и способ оценки состояния элементов заземлителей / А.И. Сидоров, Р.Т. Абдуллозода, О.С. Сайффиндинзода, И.Т. Абдуллозода, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». 24, 3 (сен. 2024), 88–94. DOI: <https://doi.org/10.14529/power240310>.

***Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных SCOPUS:***

[4-А]. Method for determining the state of grounding device / A. Sidorov, R. Abdullozoda, S. Sadullozoda, **O. Saifiddinzoda** and I. Abdullozoda // III international scientific and practical conference “current problems of the energy complex: mining, production, transfer, processing and environmental protection” (Apr. 2021), IOP Conference Series: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 808 (2021) 012005 doi:10.1088/1755-1315/808/1/012005.

[5-А]. Ensuring the Safety of a Quarry Distribution Network with a Voltage of 6–35 kV / Kh. Boboev, R. Abdullozoda, **O. Sayfiddinzoda**, I. Abdullozoda, K. Ivshina // Ensuring the Safety of a Quarry Distribution Network with a Voltage of 6–35 kV. In: Radionov, A.A., Ulrikh, D.V., Timofeeva, S.S., Alekhin, V.N., Gasiyarov, V.R. (etc.) Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. ICCATS 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 308. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21120-1\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21120-1_42)

***Патенты и авторские свидетельства:***

[6-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** Малый патент. Республика Таджикистан: МПК G01B 17/00. Устройство для определения коррозионного состояния элементов заземлителей / О.С. Сайфиддинзода, Р.Т. Абдуллозода, Б.Т. Абдуллоев, Х.Д. Бобоев– № 2401928; заявл. 07.02. 2024; опубл. 20.05. 2024, Бюл. № ТJ 1498.

[7-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** Свидетельство на компьютерную программу. №177 (Республика Таджикистан), МКИ А 61N 1/42. Программа контроллера для проведения мониторинга состояния заземляющих устройств / О.С. Сайфиддинзода, Р.Т. Абдуллозода, Х.Д. Бобоев. Опубл. 30.11.2023.

*Публикации в других изданиях:*

[8-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** Таджики олоти заминвасла / М.Х. Табаров, О.С. Сайфиддинзода // Материалы республиканской научно-практической конференции “Наука – основа инновационного развития” // Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими. Душанбе. - 2020. С. 62 – 64.

[9-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** Микроконтроллерҳо ва хусусиятҳои онҳо / О.С. Сайфиддинзода // Материалы IX международной научно-практической конференции “НАУКА – ОСНОВА ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ” // “Промэкспо”, Душанбе, 2022. С. 26 – 28.

[10-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** Расчет коррозионного состояния элементов заземлителей / Р.Т. Абдуллозода, О.С. Сайфиддинзода, Х.Д. Бобоев // Технологическая независимость и конкурентоспособность Союзного Государства, стран СНГ, ЕАЭС и ШОС. Сборник статей VI Международной научно-технической конференции. В 3-х томах. Минск, 2023. С. 292 – 296.

[11-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** Методы измерения сопротивления растеканию тока заземлителей / О.С. Сайфиддинзода // Материалы Международной научно – практической конференции: «ЭНЕРГЕТИКА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ» Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими – Душанбе: ЦИ и П ТТУ имени академика М.С. Осими, 2023. С. 179 – 181.

[12-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** О возможности применения микроконтроллеров серии Atmel в устройстве оценки надежности и безопасности / О.С. Сайфиддинзода, У.У. Косимов // Материалы IX международной научно-практической конференции “НАУКА – ОСНОВА ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ” // “Промэкспо”, Душанбе, 2024. С. 26 – 28.

[13-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** Возможность применения микроконтроллеров ATME<sup>L</sup> при контроле состояния заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллозода, О.С. Сайфиддинзода, Х.Д. Бобоев // «БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕНДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ТРЕТЬЕМ ТЫСЯЧЕЛЕТИИ» VIII Международной научно-практической конференции, приуроченной к 65-летию кафедры БЖД ЮУрГУ БЖД под ред. А.И. Сидорова. 2024. С. 20 – 23.

[14-А]. **Сайфиддинзода, О.С.** Анализ повреждаемости заземляющей сети в горнодобывающих предприятиях / О.С. Сайфиддинзода, Д.Х. Насруллоев, Х.Д. Бобоев // «БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕНДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ТРЕТЬЕМ ТЫСЯЧЕЛЕТИИ» VIII Международной научно-практической конференции, приуроченной к 65-летию кафедры БЖД ЮУрГУ БЖД под ред. А.И. Сидорова. 2024. С. 20 – 23.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Малый патент на изобретение



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Авторское свидетельство

## ШАХОДАТНОМА

дар борас ба қайд ҳифзини асардӯши шам,  
адабиёти ва санъат

30 / 14 / 2023

№ 177

30 / 07 / 2023

№ 177

Дода шуд ба: Сайфиддинзода Одилҷон Сайфиддин, Абдуллоҳозода Рамазон Толибҷон ва Бобоев Ҳуршедшоҳ Давлаталиевич дар он хусус, ки онҳо муалифони барномаи компютерии «Программа для контролера проведения мониторинга состояния заземляющих устройств (ЗУ)» мебошанд.

Жанри асар: илмӣ

Забонни асар: русӣ

Асар иборат аст аз: 2,86 КБ

Маъмуоти иловагӣ: Тибқи моддай 6-и Конуни Ҷумҳурии Тоҷикистон «Дар борас ҳуқуқи муалифи ва ҳуқуқони вобаста ба он» асари мазкур объекти ҳуқуқи муалифи мебошад.

Сардори шӯбҳаи ҳуқуқи муалифи ва ҳуқуқони вобаста ба он  
Вазоратни фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон  
А. Олимшоев



Additional information: According to Article 6 of the Law on Copyright and related rights of the Republic of Tajikistan this work is protected by copyright.

Head of Department of  
of copyright and related rights of the  
Ministry of culture of the Republic of Tajikistan  
A. Olimshoев



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

## Акты внедрения результатов диссертационной работы



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН  
ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика М.С. Осими

734042, Душанбе, просп. академиков Раджабовых, 10, Тел.: (+992 37) 221-35-11, Факс: (+992 37) 221-71-35  
Web: [www.ttu.tj](http://www.ttu.tj) E-mail: [info@ttu.tj](mailto:info@ttu.tj)



## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Сайфиддинзода  
Одилджона Сайфиддин в учебный процесс ТТУ им. акад. М.С. Осими

Комиссия в составе: начальника учебного управления д.т.н., доцента Сайдализода А.С. - председателя комиссии, начальника управления науки и инновации к.т.н. Бозорова Ш.А. и заведующего кафедрой релейной защиты и автоматизации энергосистем к.т.н., доцента Мирзозода Б.М. - членов комиссии, настоящим подтверждаем, что результаты научного исследования Сайфиддинзода О.С. на тему **«Автоматизированная система оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания»**, используются в учебном процессе на энергетическом факультете Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Полученные автором данные при разработке автоматизированной системы используются в процессе изучения студентами ТТУ имени академика М.С. Осими «Энергетическая электроника», «Элементы автоматических устройств», «Электробезопасность» и «Основы микропроцессорной техники».

Изучение указанных результатов позволяет повысить качество изучения вышеуказанных дисциплин с учетом современных научных и практических требований.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ:  
Начальник учебного управления

Сайдализода А.С.

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:  
Начальник управления науки и инновации

Бозоров Ш.А.

Заведующий кафедрой  
«Релейная защита и автоматизация энергосистем»

Мирзозода Б.М.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

## Справка внедрения результатов диссертационной работы



**ЧАМЬЯТИ САҲОМИИ КУШОДАИ  
«БАРҚИ ТОҶИК»**

734026, ш. Душанбе, хиёбони Исмоили Сомонӣ-64 Тел: +992 372 235-86-66 Факс: (10992372) 35-86-92;  
Сомона: [www.barqitojik.tj](http://www.barqitojik.tj), Почта: [barki.tojik@gmail.com](mailto:barki.tojik@gmail.com)

№ 1/2374-3241 аз «15» и соли 2024

Ба № \_\_\_\_\_ аз « \_\_\_\_ » \_\_\_\_ соли 20 \_\_\_\_

## АКТ

О внедрении результатов работы Сайфиддинзода Одилджона Сайфиддин «Автоматизированная система оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания» представленной на соискание учёной степени доктора философии (PhD) – доктора по специальности 6D071800 – Электроэнергетика

Настоящим актом подтверждается заинтересованность в использовании результатов и выводов диссертационной работы Сайфиддинзода О.С. «Автоматизированная система оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания».

Энергетическая компания рассматривает возможность оценки надежности электрооборудования и безопасности его обслуживания при распределенной генерации с целью повышения качества электроснабжения удаленных потребителей.

Оценка надежности и безопасности электрооборудования позволяет повысить качество проектирования и эффективности оборудования электроэнергетической системы.

Заместитель Генерального директора



Курбонзода А.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Результаты измерений автоматизированной системы

