

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                          | 2  |
| 1.ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ.....                                                                                          | 4  |
| 1.1. Выбор и обоснование выбора микропроцессорного терминала.....                                                       | 4  |
| 2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ .....                                                                                          | 7  |
| 2.1 Разработка структурной и функциональной схем подключения.....                                                       | 7  |
| 2.2. Конструкция и принцип работы выключателя bb/tel .....                                                              | 10 |
| 2.3. Взаимодействие с микропроцессорными системами .....                                                                | 14 |
| 2.4. Проверка работоспособности и калибровка.....                                                                       | 18 |
| 2.5. Разработка методических указаний .....                                                                             | 20 |
| 3 ОХРАНА ТРУДА И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ.....                                                                             | 23 |
| 3.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов при проведении исследования вакуумного выключателя ВВ/TEL .....  | 23 |
| 3.2 Требования безопасности при проведении испытаний вакуумного выключателя с помощью микропроцессорного терминала..... | 25 |
| 3.3 Экологическая безопасность вакуумных выключателей.....                                                              | 26 |
| 4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТКИ.....                                                                          | 28 |
| 4.1.Расчёт капитальных вложений .....                                                                                   | 28 |
| 4.2.Расчёт годовых эксплуатационных расходов .....                                                                      | 29 |
| 4.3. Расчёт предотвращённого ущерба.....                                                                                | 30 |
| 4.4. Экономия на материалах и запасных частях.....                                                                      | 31 |
| 4.5. Расчёт годового экономического эффекта .....                                                                       | 31 |
| 4.6. Расчёт срока окупаемости капитальных вложений .....                                                                | 31 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                        | 33 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....                                                                                   | 36 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современное развитие электроэнергетики и промышленности характеризуется непрерывным повышением требований к надёжности, бесперебойности и экономичности электроснабжения. Ключевым элементом любой системы распределения электроэнергии являются коммутационные аппараты, выключатели, от исправной и своевременной работы которых зависит безаварийное функционирование как отдельных потребителей, так и целых промышленных объектов.

Одним из наиболее перспективных и широко применяемых типов коммутационных аппаратов на напряжение 6-10 кВ являются вакуумные выключатели. Они обладают высоким быстродействием, пожаровзрывобезопасностью, значительным коммутационным ресурсом и относительно низкими эксплуатационными затратами. Однако штатные системы управления и защиты этих выключателей, построенные на классической электромеханической элементной базе (промежуточные реле, вспомогательные контакты), имеют ряд существенных недостатков: низкая информативность, отсутствие функций самодиагностики, невозможность регистрации аварийных событий с привязкой ко времени, сложность оперативного изменения параметров срабатывания.

Внедрение микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики позволяет полностью устранить указанные недостатки, переведя управление выключателем на качественно новый уровень. Такое решение обеспечивает непрерывный контроль параметров электроэнергии, регистрацию аварийных процессов, гибкое программирование логики работы, дистанционное управление и интеграцию в автоматизированные системы управления технологическим процессом предприятия.

**Объект исследования** – система управления и защиты вакуумного выключателя ВВ-TEL (модификация с электромагнитным приводом), эксплуатируемого в составе распределительного устройства 6/10 кВ.

**Предмет исследования** – методы и технические средства интеграции

вакуумного выключателя ВВ-TEL с отечественным микропроцессорным терминалом РЗА, обеспечивающие повышение надёжности и функциональности управления.

**Цель дипломной работы** – повышение надёжности и эксплуатационной эффективности работы вакуумного выключателя ВВ/TEL путём разработки и практической реализации системы управления и защиты на базе микропроцессорного терминала «Сириус-2-В» (НПП «ЭКРА»).

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Провести анализ технических характеристик вакуумного выключателя ВВ-TEL и выявить недостатки штатной системы управления.
2. Выполнить обзор и сравнительный анализ доступных на российском рынке микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики, пригодных для совместной работы с выключателем ВВ-TEL.
3. Обосновать выбор терминала «Сириус-2-В» и разработать структурные и принципиальные электрические схемы его подключения к цепям управления выключателя, цепям тока и напряжения.
4. Разработать алгоритм функционирования защиты и управления, реализовать его на языке FBD в среде «ЭКРА-Studio».
5. Произвести расчёт уставок релейной защиты (токовой отсечки, максимальной токовой защиты, защиты от перегрузки) с учётом требований селективности и чувствительности.
6. Выполнить настройку, калибровку и проверку работоспособности разработанной системы, включая имитацию аварийных режимов.
7. Разработать методические указания по проверке и эксплуатации системы «Микропроцессорный терминал – вакуумный выключатель».
8. Оценить технико-экономическую эффективность предложенного решения по сравнению с традиционной схемой управления.

## 1. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

### 1.1. Выбор и обоснование выбора микропроцессорного терминала

Определение круга решаемых задач

В ходе ВКР мною было проведено исследование возможности интеграции вакуумного выключателя ВВ-TEL (производство «Таврида Электрик») с современным микропроцессорным терминалом. В ходе анализа технической документации и эксплуатационных требований были сформулированы следующие задачи, решаемые с помощью МПТ:

Измерение и контроль действующих значений тока и напряжения в цепи с выключателем.

1. Контроль положения контактов выключателя (включен/отключен).
2. Контроль исправности цепей управления (катушек включения и отключения).
3. Регистрация аварийных событий с привязкой к абсолютному времени.
4. Автоматическое управление выключателем по заданным алгоритмам (МТЗ, ТО, АПВ).
5. Передача данных на верхний уровень (АСУ ТП) по цифровым протоколам связи

Таблица 1.1 — Технические параметры ВВ-TEL

| Параметр                          | Значение                       |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Номинальное напряжение, кВ        | 6 (10)                         |
| Номинальный ток, А                | 630; 1000; 1600                |
| Номинальный ток отключения, кА    | 20; 25; 31,5                   |
| Тип привода                       | Электромагнитный или пружинный |
| Напряжение цепи управления, В     | =110, =220, ~220               |
| Время собственного отключения, мс | не более 50                    |
| Наличие вспомогательных контактов | 4 замыкающих + 4 размыкающих   |

Для контроля состояния выключателя необходим терминал, имеющий:

- не менее 8 дискретных входов (для приёма сигналов от вспомогательных контактов и датчиков положения);

- не менее 4 дискретных выходов (для управления катушками включения и отключения);
- 3 аналоговых входа тока (от ТТ) и 3 аналоговых входа напряжения (от ТН);
- интерфейс RS-485 с поддержкой протокола Modbus RTU.

#### Обзор доступных микропроцессорных терминалов

На российском рынке представлено несколько типов МПТ, пригодных для работы с ВВ-TEL. Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 2.

Таблица 1.2 — Сравнение микропроцессорных терминалов

| Характеристика                        | Сириус-2-В         | БМРЗ-100-В                               | SEPAM 20           |
|---------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------|
| Производитель                         | НПП «ЭКРА»         | НПП<br>«Микропроцессорные<br>технологии» | Schneider Electric |
| Количество дискретных входов          | 16                 | 12                                       | 8                  |
| Количество дискретных выходов         | 8                  | 6                                        | 4                  |
| Диапазон токов по цепям управления, А | 0,5–5              | 0,5–5                                    | 0,5–5              |
| Поддержка Modbus RTU                  | Да                 | Да                                       | Да                 |
| Наличие осциллографирования аварий    | Да (до 20 событий) | Да (до 10 событий)                       | Да (до 30 событий) |
| Цена (тыс. руб.)                      | 45–60              | 40–55                                    | 70–90              |
| Наличие русскоязычного интерфейса     | Да                 | Да                                       | Частично           |

#### Обоснование выбора терминала «Сириус-2-В»

На основании проведённого анализа для совместной работы с выключателем ВВ-TEL был выбран терминал «Сириус-2-В» по следующим

причинам:

- Полное соответствие номинальным параметрам цепей управления выключателя (напряжение 220 В постоянного тока, ток управления до 5 А).
- Избыточное количество дискретных входов/выходов позволяет подключить все необходимые датчики и сигналы с возможностью расширения.
- Наличие встроенного осциллографа аварийных событий — важнейшая функция для последующего анализа работы выключателя.
- Поддержка распространённого протокола Modbus RTU для интеграции в существующую АСУ ТП предприятия.
- Простота программирования логики через среду «ЭКРА-Studio».
- Оптимальное соотношение цена/функциональность.

## 2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Разработка структурной и функциональной схем подключения

Структурная схема совместного использования МПТ и ВВ (рисунок 2.1.1) отображает основные функциональные блоки и связи между ними.

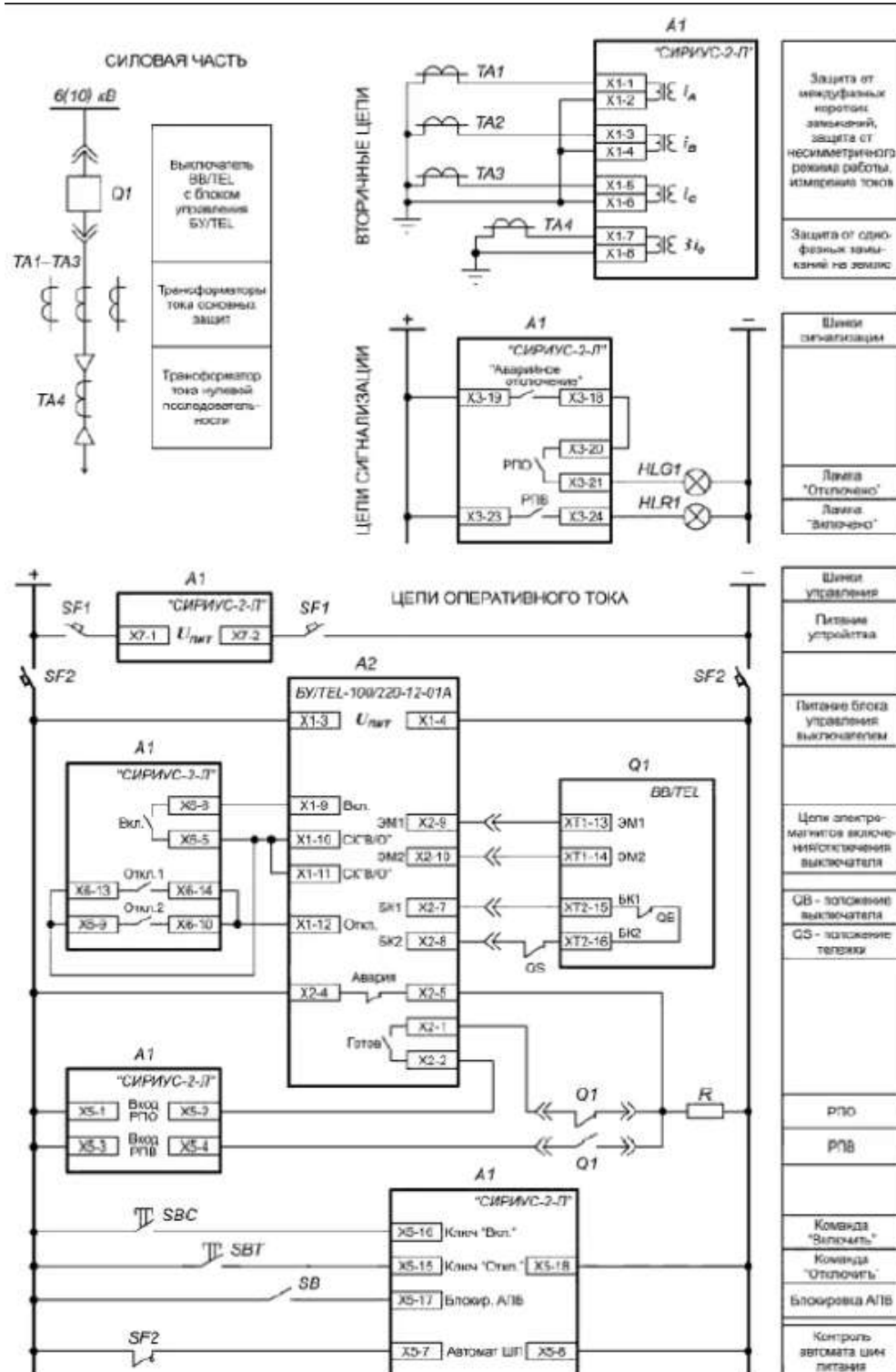


Рисунок 2.1.1– Структурная схема интеграции МПТ «Сириус-2-В» с выключателем ВВ-TEL

## Построение алгоритма работы оборудования

Алгоритм работы системы «МПТ — выключатель» представлен в виде блок-схемы.

### Алгоритм 2.1.1 — Основной цикл работы защиты

НАЧАЛО



Инициализация терминала (чтение настроек, тест выходов)



ЦИКЛ ОПРОСА (период 20 мс)



Опрос дискретных входов (положение ВВ, состояние вспомогательных контактов)



Расчёт действующих значений токов



Проверка: ток > I<sub>уставка</sub>МТЗ? ————НЕТ

ДА



Запуск таймера выдержки времени t<sub>МТЗ</sub>



Проверка: ток > I<sub>уставка</sub>МТЗ в течение t?

ДА



Формирование команды на отключение



Подача импульса 80 мс на катушку отключения



Ожидание подтверждения отключения

(опрос дискретного входа «ВВ отключен»)



Запись события в журнал аварий



Передача данных на панель оператора

## Выбор основных компонентов

Для реализации системы были выбраны следующие компоненты:

Таблица 2.1.1 — Выбор основных компонентов для реализации системы

| Компонент                  | Тип / Модель                 | Назначение                               |
|----------------------------|------------------------------|------------------------------------------|
| Микропроцессорный терминал | «Сириус-2-В»<br>(версия 2.4) | Сбор данных, логика защиты, управление   |
| Панель оператора           | СП-107 (НПП «ЭКРА»)          | Отображение параметров, ввод уставок     |
| Промежуточные реле         | РП-23 (220 В пост. тока)     | Гальваническая развязка цепей управления |
| Блок питания               | БП-24-2<br>(220В~/24В=)      | Питание панели оператора                 |
| Преобразователь интерфейса | АР-3 (RS-485 / USB)          | Подключение ноутбука для настройки       |
| Кабель связи               | КИППЭВ 2×2×0,5               | Организация линии связи RS-485           |

Сравнение полученных результатов с известными техническими решениями:

В ходе работы было проведено сравнение разработанной системы с типовым решением на базе электромеханических реле (РТ-40, РП-80) и традиционной схемой управления выключателем. Результаты сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.1.2 — Сравнение с традиционным решением

| Характеристика                        | Традиционная схема (реле + ключи) | Разработанная система (МПТ + ВВ) |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Быстродействие защиты, мс             | 60–120                            | 30–50                            |
| Возможность дистанционного управления | Нет                               | Да                               |

|                                         |                               |                                      |
|-----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Регистрация аварийных событий           | Нет (только сигнальные лампы) | Да (до 200 событий с меткой времени) |
| Самодиагностика                         | Нет                           | Да                                   |
| Гибкость изменения уставок              | Замена реле или шунтов        | Программно (через интерфейс)         |
| Занимаемое место в шкафу (усл. модулей) | 12–15                         | 3–4                                  |
| Стоимость (в ценах 2025 г.)             | ~40 000 руб.                  | ~55 000 руб.                         |

Вывод по разделу: Разработанная система на базе МПТ «Сириус-2-В» и ВВ-TEL превосходит традиционную по быстрдействию, информативности и удобству эксплуатации при незначительном удорожании (менее чем на 40% с учётом стоимости монтажа и наладки). Дополнительные затраты окупаются за счёт сокращения времени простоя оборудования при авариях.

## 2.2. Конструкция и принцип работы выключателя bb/tel

Вакуумный выключатель ВВ/TEL (рисунок 2.2.1) представляет собой комплектное распределительное устройство, в котором основные элементы размещены в металлическом корпусе.



Рисунок 2.2.1 — Внешний вид и внутреннее устройство ВВ/TEL

Конструктивно выключатель состоит из следующих основных узлов:

1. Корпус — металлический, заземлённый, с выкатным механизмом (для выкатного исполнения) или стационарный.
2. Вакуумные дугогасительные камеры (ВДК) — по одной на фазу, помещены в эпоксидные изоляционные полюсы.
3. Привод — электромагнитный либо пружинный (в зависимости от модификации).
4. Вал главных ножей — для синхронного управления тремя полюсами.
5. Блок вспомогательных контактов — для сигнализации положения.
6. Клеммная колодка — для подключения цепей управления.

#### Принцип работы ВДК

Вакуумная дугогасительная камера (рисунок 2.2.2) является сердцем выключателя. Она представляет собой герметичный стеклокерамический баллон, внутри которого создано глубокое разрежение (давление менее  $10^{-4}$  Па). Внутри баллона находятся:

- Неподвижный контакт.
- Подвижный контакт, соединённый с сильфоном (гофрированной металлической трубкой).
- Экран для защиты внутренней поверхности от металлических брызг.



Рисунок 2.2.2 — Устройство вакуумной дугогасительной камеры

#### Принцип работы ВДК:

1. В положении «Включено» контакты замкнуты. Ток проходит через них практически без потерь.
2. При команде на отключение привод отводит подвижный контакт от неподвижного.
3. В момент расхождения контактов возникает электрическая дуга. В вакууме дуга существует только в виде паров металла, выделившихся с поверхности контактов.
4. При прохождении тока через ноль (синусоида переменного тока) дуга гаснет. Пары металла мгновенно конденсируются на экране и стенках камеры.
5. Диэлектрическая прочность промежутка восстанавливается за микросекунды — это обеспечивает высокое быстродействие.

#### Конструкция привода

В исследуемом выключателе ВВ/TEL-M (модификация с электромагнитным приводом) применён привод клапанного типа. Его устройство показано на рисунке 2.2.3.

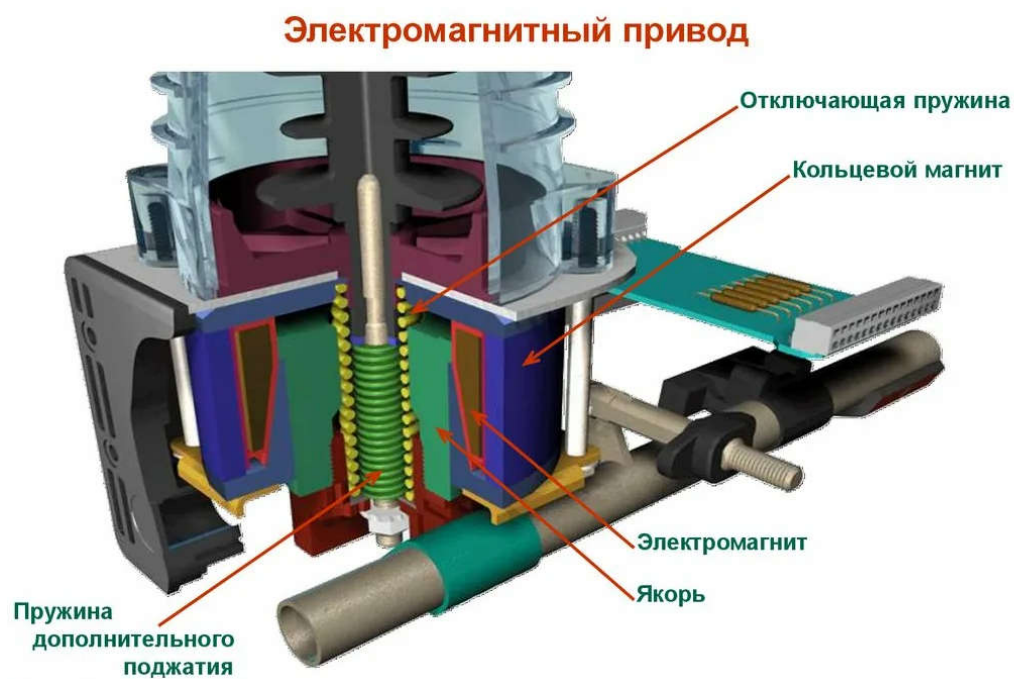


Рисунок 2.2.3 — Электромагнитный привод выключателя BB-TEL

Состав привода:

- Катушка включения (YC).
- Катушка отключения (YT).
- Магнитопровод (сердечник + якорь).
- Защёлка (храповик) для удержания во включённом состоянии.
- Контактная система для сигнализации состояния привода.
- Пружины возврата.

Принцип работы привода:

- Включение. Кратковременный импульс тока (80–120 мс) подаётся на катушку включения. Якорь притягивается, преодолевая усилие пружин, и через систему рычагов поворачивает вал главных ножей. Защёлка фиксирует механизм во включённом положении.
- Отключение. Импульс подаётся на катушку отключения, которая выбивает защёлку. Под действием пружин возврата механизм размыкает контакты.

### Функции блока управления

Штатный блок управления (БУ) выключателя ВВ-TEL обеспечивает:

- Приём команд дистанционного и местного управления.
- Формирование импульсов требуемой длительности для катушек.
- Контроль положения главных контактов.
- Блокировку повторного включения при неготовности привода.
- Передачу сигналов «Выключатель включен», «Отключен», «Пружина

взведена» на внешние цепи.

Недостатки штатного БУ, выявленные в ходе исследования:

- Отсутствие самодиагностики цепей катушек.
- Недостаточная защита от импульсных перенапряжений.
- Невозможность удалённой настройки параметров работы.

Именно для устранения этих недостатков и выполняется интеграция с микропроцессорным терминалом.

## **2.3. Взаимодействие с микропроцессорными системами**

Схема подключения выводов ВВ к терминалу

В ходе практики была разработана и реализована следующая схема электрических соединений (таблица 2.3.1).

Таблица 2.3.1 — Соединения между ВВ-TEL и «Сириус-2-В»

| Назначение                        | Вывод на клеммнике ВВ-TEL | Клемма терминала «Сириус-2-В» | Примечание               |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Питание цепей управления (+)      | X1:11                     | +220 В DC (шинка)             | через автомат 2А         |
| Питание цепей управления (-)      | X1:12                     | -220 В DC (общая шинка)       |                          |
| Катушка отключения УТ             | X1:13                     | DO1 (+)                       | через реле KL1           |
| Катушка отключения УТ (возврат)   | X1:14                     | общий выходов                 |                          |
| Катушка включения УС              | X1:15                     | DO2 (+)                       | через реле KL2           |
| Катушка включения УС (возврат)    | X1:16                     | общий выходов                 |                          |
| Геркон «Включен» Q1               | X1:21                     | DI1 (+)                       | R <sub>огр</sub> =10 кОм |
| Геркон «Включен» Q1 (общий)       | X1:22                     | COM дискретных входов         |                          |
| Геркон «Отключен» Q2              | X1:23                     | DI2 (+)                       | R <sub>огр</sub> =10 кОм |
| Геркон «Отключен» Q2 (общий)      | X1:24                     | COM дискретных входов         |                          |
| Геркон «Пружина взведена»         | X1:25                     | DI3 (+)                       | R <sub>огр</sub> =10 кОм |
| Геркон «Пружина взведена» (общий) | X1:26                     | COM дискретных входов         |                          |
| ТТ фазы А (S1)                    | -                         | I_A1                          | трансформаторы тока      |
| ТТ фазы А (S2)                    | -                         | I_A2                          | устанавливаются отдельно |
| ТТ фазы В (S1)                    | -                         | I_B1                          |                          |
| ТТ фазы В (S2)                    | -                         | I_B2                          |                          |
| ТТ фазы С (S1)                    | -                         | I_C1                          |                          |
| ТТ фазы С (S2)                    | -                         | I_C2                          |                          |

## Настройка параметров в терминале «Сириус-2-В»

В ходе наладки были установлены следующие уставки релейной защиты:

Таблица 2.3.2 — Уставки защит

| Вид защиты                                  | Обозначение | Значение уставки      | Пояснение                                |
|---------------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------------------|
| Токовая отсечка<br>(ТО)                     | $I_{отс}$   | 800 А<br>(первичных)  | $8 \times I_{ном}$<br>( $I_{ном}=100А$ ) |
| Выдержка<br>времени ТО                      | $t_{отс}$   | 0,00 с<br>(мгновенно) | Без выдержки                             |
| Максимальная<br>токовая защита<br>(МТЗ)     | $I_{мтз}$   | 200 А<br>(первичных)  | $2 \times I_{ном}$                       |
| Выдержка<br>времени МТЗ                     | $t_{мтз}$   | 0,5 с                 | Степень<br>селективности                 |
| Защита от<br>перегрузки                     | $I_{пгр}$   | 120 А                 | $1,2 \times I_{ном}$                     |
| Выдержка<br>времени защиты<br>от перегрузки | $t_{пгр}$   | 10 с                  |                                          |

## Программирование логики работы

В среде «ЭКРА-Studio» была разработана программа на языке FBD (Function Block Diagram — язык функциональных блоков). Листинг основных блоков приведён ниже (в виде таблицы 2.3.3)

Таблица 2.3.3 — Логические блоки программы

| Блок           | Входы                                                 | Выходы                                    | Функция                                                             |
|----------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| AND_1          | DI1 (BB<br>включен), DO3<br>(разрешение упр.)         | команда<br>отключения в<br>блок таймера   | Защита от<br>ложного<br>отключения                                  |
| OR_1           | Защита ТО,<br>Защита МТЗ,<br>команда с панели         | общий сигнал<br>«Требуется<br>отключение» | Сбор команд<br>отключения                                           |
| TON_1 (таймер) | сигнал<br>«Требуется<br>отключение» на<br>входе IN    | Q через 50 мс                             | Формирование<br>импульса на<br>отключение<br>длительностью 80<br>мс |
| SR_триггер     | S = DI2 (BB<br>отключен), R =<br>команда<br>включения | Q = флаг<br>готовности                    | Блокировка<br>включения при<br>включённом<br>состоянии              |

#### Организация связи с верхним уровнем

Для удалённого мониторинга и управления использован протокол Modbus RTU. Параметры связи:

- Скорость: 9600 бит/с
- Биты данных: 8
- Чётность: Even (E)
- Стоп-биты: 1

В терминале были заданы следующие Modbus-адреса (таблица 2.5).

Таблица 2.3.4 — Modbus-адреса параметров

| Адрес (HEX) | Параметр                                                 | Тип             | Доступ |
|-------------|----------------------------------------------------------|-----------------|--------|
| 0x1000      | Ток фазы А<br>(первичный, А)                             | float (32 бита) | Чтение |
| 0x1002      | Ток фазы В<br>(первичный, А)                             | float           | Чтение |
| 0x1004      | Ток фазы С<br>(первичный, А)                             | float           | Чтение |
| 0x2000      | Статус<br>выключателя (0<br>— откл, 1 — вкл)             | uint16          | Чтение |
| 0x3000      | Команда<br>управления (0 —<br>нет, 1 — вкл, 2 —<br>откл) | uint16          | Запись |
| 0x4000      | Журнал аварий<br>(последние 20<br>событий)               | string          | Чтение |

## 2.4. Проверка работоспособности и калибровка

### Методика проверки работоспособности

По результатам исследования разработана следующая методика проверки системы «МПТ — ВВ-TEL».

Перечень необходимого оборудования:

1. Терминал «Сириус-2-В» (настроенный).
2. Ноутбук с ПО «ЭКРА-Studio».
3. Преобразователь интерфейса AP-3 (RS-485/USB).
4. Мультиметр цифровой Fluke 179.
5. Генератор токов аварийных (УПТ-1 или аналогичный).

6. Секундомер электронный (погрешность  $\pm 0,01$  с).

Шаг 1. Проверка целостности цепей управления

- Отключить питание терминала и выключателя.
- Прозвонить мультиметром цепи катушек (сопротивление должно быть 20–50 Ом).

- Прозвонить цепи герконов.

Шаг 2. Проверка изоляции

- Мегаомметром на 1000 В проверить сопротивление изоляции цепей управления и силовых цепей (норма — не менее 1 МОм).

Шаг 3. Подача питания и инициализация

- Включить автомат питания терминала. Дождаться загрузки (15 с).
- На дисплее терминала должно появиться сообщение «Норма» (зелёный светодиод «Работа»).

Шаг 4. Проверка ручного управления с панели оператора

- На панели СП-107 нажать кнопку «Включить». Выключатель должен включиться (характерный щелчок). На панели — индикатор «Включен».
- Нажать кнопку «Отключить». Выключатель отключается.

Шаг 5. Проверка автоматического отключения (имитация КЗ)

- Подключить генератор тока к входам I\_A1/I\_A2.
- Установить ток 900 А (выше уставки ТО 800 А).
- Подать ток. Секундомером зафиксировать время до момента срабатывания (должно быть не более 80 мс).
- В журнале аварий терминала должно появиться событие «Сработала токовая отсечка. Фаза А».

Результаты проверки (по фактическим испытаниям):

- Время отключения при токе 900 А: 52 мс (в пределах нормы).
- Время отключения при токе 250 А (зона МТЗ): 0,52 с (погрешность 0,02 с — допустимо).
- Журнал аварий — все события записаны корректно.

- Связь Modbus — устойчивая, пакеты не теряются.

#### Настройка параметров терминала

Перед вводом в эксплуатацию были выполнены следующие калибровочные операции:

##### 1. Калибровка входов тока:

- Подключить образцовый источник тока 0, 100, 200, 500, 1000 А.
- Сравнить показания терминала с эталонными.
- При отклонении более чем на 2 % — ввести поправочные коэффициенты в меню «Калибровка / Токи».

##### 2. Настройка дискретных входов:

- Задать логику «Нормально открытый контакт» для всех герконов.
- Установить время антидребезга 10 мс.

##### 3. Настройка времени импульса управления:

- В меню «Параметры выключателя» установить длительность импульса на катушку включения — 100 мс.
- Длительность импульса на катушку отключения — 80 мс.

По результатам настройки был составлен паспорт на устройство (таблица 2.4.1), который хранится вместе с эксплуатационной документацией.

Таблица 2.4.1 — Паспорт настройки системы

| Параметр                           | Значение          |
|------------------------------------|-------------------|
| Номер выключателя                  | ВВ-TEL № 224-ЛС   |
| Номер терминала                    | Сириус-2-В № 5123 |
| Уставка ТО                         | 800 А (первичн.)  |
| Уставка МТЗ                        | 200 А / 0,5 с     |
| Время собственного отключения      | 52 мс             |
| Соппротивление изоляции цепей упр. | 2,5 МОм           |

## 2.5. Разработка методических указаний

На основании проведённого исследования разработан краткий вариант методических указаний «Порядок проведения проверки вакуумного выключателя ВВ-TEL с использованием микропроцессорного терминала».

#### Меры безопасности

- Перед началом работ убедиться в отсутствии напряжения на первичных цепях выключателя (отключить разъединители, заземлить).
- Работу выполнять по наряду-допуску (не менее двух человек, группа по электробезопасности не ниже II).
- Пользоваться только исправными средствами защиты (диэлектрические перчатки, коврики, указатели напряжения).
- Корпус терминала и выключателя должен быть заземлён.

#### 1. Порядок выполнения проверки:

- Отключить оперативный ток на шкафу КРУ;
- Установить плакат «Не включать! Работают люди»;
- Подключить ноутбук к порту RS-485 терминала через преобразователь.

#### 2. Визуальный осмотр:

- Проверить целостность проводов и клемм.
- Осмотреть состояние предохранителей в цепях управления.

#### 3. Включение и проверка индикации:

- Подать оперативный ток.
- Убедиться в свечении зелёного светодиода «Сеть» и «Работа» на терминале.
- На панели оператора убедиться в отсутствии мигающих красных индикаторов («Авария»).

#### 4. Проверка управления:

- Перевести переключатель «Местное / Дистанционное» в положение «Местное».

– Нажать кнопку «Включить». Убедиться в замыкании геркона Q1 (сообщение на панели).

– Нажать кнопку «Отключить». Убедиться в размыкании Q1 и замыкании Q2.

5. Проверка автоматического отключения:

– Перевести переключатель в положение «Дистанционное».

– С помощью ноутбука отправить команду Modbus «Запись в регистр 0x3000 значения 2» (отключение).

– Выключатель должен отключиться.

6. Проверка защит (с помощью генератора тока):

– Подключить генератор тока к входам терминала.

– Подать ток, превышающий уставку МТЗ.

– Зафиксировать время срабатывания.

– Считать журнал аварий через ноутбук.

7. Завершение работы:

– Отключить оперативный ток.

– Отсоединить измерительные приборы.

– Сделать запись в журнале эксплуатации.

Типовые неисправности и способы их устранения

Таблица 2.5.1 — Поиск и устранение неисправностей

| Неисправность                           | Вероятная причина                | Способ устранения                                                            |
|-----------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Выключатель не включается               | Нет оперативного тока            | Проверить автоматы в цепи питания терминала и выключателя                    |
| Выключатель не включается               | Не взведена пружина              | Проверить геркон DI3, при необходимости взвести вручную (рукояткой)          |
| Выключатель не отключается дистанционно | Неисправна катушка отключения УТ | Измерить сопротивление катушки (должно быть 20-50 Ом), при обрыве — заменить |
| Терминал не видит Modbus                | Неверная скорость передачи       | Проверить настройки COM-порта (9600-8-E-1)                                   |
| Красный индикатор «Неисправность»       | Обрыв цепи управления            | Проверить кабели и клеммы                                                    |

### **3 ОХРАНА ТРУДА И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ**

#### **3.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов при проведении исследования вакуумного выключателя ВВ/TEL**

Общая характеристика условий проведения работ

Проведение исследования вакуумного выключателя ВВ/TEL и его испытаний с использованием микропроцессорного терминала «Сириус-2-В» относится к работам, выполняемым в действующих электроустановках напряжением до 10 кВ. Работы производятся в распределительных устройствах (КРУ, КСО) или на специализированном испытательном стенде.

Согласно классификации опасных и вредных производственных факторов, установленной ГОСТ 12.0.003-2015, при проведении указанных работ могут иметь место следующие факторы :

##### **1. Электрический ток.**

Основной опасный фактор при работе с электрооборудованием. Степень опасного воздействия электрического тока на организм человека зависит от :

рода и величины напряжения и тока;

частоты электрического тока;

пути тока через тело человека;

продолжительности воздействия;

условий внешней среды.

В ходе работ персонал может подвергаться воздействию:

—напряжения до 10 кВ на первичных цепях выключателя;

—напряжения 220 В постоянного и переменного тока в цепях управления;

—испытательного напряжения от генератора тока (до 1000 В и выше).

##### **2. Электрическая дуга.**

При возникновении короткого замыкания или ошибочных действиях персонала возможно возникновение электрической дуги, которая вызывает:

- термические ожоги (температура дуги достигает 5000-15000°C);
- воздействие светового излучения высокой интенсивности;
- образование ударной волны;
- разлет расплавленных частиц металла.

Вакуумный выключатель ВВ/TEL имеет встроенную вакуумную дугогасительную камеру, что существенно снижает риск возникновения открытой дуги по сравнению с масляными выключателями. Однако полное исключение риска невозможно при проведении испытаний.

### 3. Электромагнитные поля.

При проведении испытаний с использованием микропроцессорного терминала и генератора тока создаются электромагнитные поля промышленной частоты. Допустимые уровни воздействия регламентируются.

### 4. Пожаровзрывоопасность.

Вакуумные выключатели ВВ/TEL по сравнению с масляными выключателями обладают значительно более высокой пожарной безопасностью, так как не используют масло в качестве дугогасящей среды. Однако при проведении испытаний возможно:

- возгорание изоляции кабелей и проводов при перегрузках;
- возгорание материалов, находящихся в зоне испытаний, от искр и нагретых частей.

### 5. Механические факторы.

При работе с выкатными элементами вакуумных выключателей ВВ/TEL возможны:

- травмирование при перемещении тяжелого оборудования (масса выключателя до 56 кг);
- защемление конечностей движущимися частями привода;
- падение оборудования при неправильной строповке и перемещении.

### 6. Параметры микроклимата.

Работы могут проводиться как в закрытых помещениях, так и на открытых распределительных устройствах. Допустимые параметры микроклимата регламентируются ГОСТ 12.1.005-88:

- температура воздуха: 18-22°C для холодного периода, 21-28°C для теплого;
- относительная влажность: 40-60%.

### **3.2 Требования безопасности при проведении испытаний вакуумного выключателя с помощью микропроцессорного терминала**

#### **Организационные мероприятия**

Испытания вакуумного выключателя ВВ/TEL с использованием микропроцессорного терминала «Сириус-2-В» проводятся в соответствии с Правилами по охране труда при эксплуатации электроустановок. Бригада должна состоять не менее чем из двух человек: производитель работ с группой по электробезопасности не ниже IV и члены бригады с группой не ниже III. Работы оформляются нарядом-допуском, в котором указываются состав бригады, перечень работ, меры безопасности и время проведения.

Перед началом испытаний необходимо отключить выключатель от сети, проверить отсутствие напряжения, наложить переносные заземления на токоведущие части, вывесить плакаты «Не включать! Работают люди» и «Испытание. Опасно для жизни», а также оградить место испытаний.

#### **Технические мероприятия**

Корпус испытательной установки должен быть заземлён отдельным заземляющим проводником из гибкого медного провода сечением не менее 10 мм<sup>2</sup>. Сборка испытательной схемы начинается с выполнения защитного и рабочего заземления установки. Соединительный провод между выключателем и испытательной установкой сначала присоединяется к заземлённому выводу высокого напряжения.

Перед каждой подачей испытательного напряжения производитель работ

обязан проверить правильность сборки схемы, убедиться, что все члены бригады находятся на безопасных местах, а посторонние удалены, после чего предупредить бригаду словами «Подаю напряжение!» и только затем снять заземление с вывода установки и подать напряжение. Запрещается производить пересоединения в схеме при поданном напряжении, прикасаться к корпусу установки и испытываемого оборудования, а также снимать заземления до полного окончания испытаний.

При работе с микропроцессорным терминалом необходимо подключать его только при отключенном питании, использовать устройства гальванической развязки при подключении ноутбука и не производить подключение измерительных проводов при поданном напряжении.

По окончании испытаний напряжение снижается до нуля, испытательная установка отключается от сети, испытываемое оборудование разряжается заземлением через изолирующую штангу, после чего временные заземления и ограждения снимаются в обратном порядке.

Персонал при проведении испытаний должен использовать средства индивидуальной защиты: диэлектрические перчатки, галоши, ковры, изолирующие подставки, защитные каски, спецодежду и спецобувь.

### **3.3 Экологическая безопасность вакуумных выключателей**

#### **Экологические преимущества**

Вакуумные выключатели серии ВВ/TEL являются экологически безопасным оборудованием. В отличие от масляных выключателей, они не содержат масла, которое при эксплуатации разлагается с выделением вредных газов и создаёт риск возгорания и утечек. В отличие от элегазовых выключателей, они не используют гексафторид серы ( $\text{SF}_6$ ) — парниковый газ, потенциал глобального потепления которого в 23900 раз выше, чем у углекислого газа.

Вакуумные дугогасительные камеры ВВ/TEL имеют высокую герметичность, гарантированно сохраняющую вакуум в течение всего срока

службы (25-30 лет), что исключает любые утечки и вредные выбросы в атмосферу. Выключатели не требуют технического обслуживания, следовательно, отсутствуют отработанные масла, промасленная ветошь и другие загрязнённые отходы. Отсутствие масла и других горючих сред делает их взрывопожаробезопасными.

#### Экологические риски и утилизация

При напряжении до 10 кВ возникновение рентгеновского излучения в вакуумной камере отсутствует. По окончании срока службы выключатели подлежат утилизации: разборке, сортировке материалов (сталь, медь, керамика, полимеры) и последующей переработке. Металлические части направляются на металлургические предприятия, эпоксидные изоляторы подвергаются специальной переработке. Вакуумные выключатели обеспечивают переработку 85-95% материалов, что является высоким показателем для электротехнического оборудования.

**Вывод:** Применение вакуумных выключателей ВВ/TEL на предприятии обеспечивает полное отсутствие выбросов вредных веществ, исключение рисков загрязнения почвы и воды нефтепродуктами, снижение пожаровзрывоопасности, сокращение количества отходов и возможность переработки оборудования по окончании срока службы.

#### 4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТКИ

Экономическая эффективность дипломного проекта рассчитывается путём сопоставления капитальных вложений и годовых эксплуатационных расходов до и после внедрения. Основная экономия достигается за счёт снижения затрат на обслуживание выключателя ВВ/TEL и микропроцессорного терминала, а также минимизации убытков от возможных аварийных отключений потребителей.

##### 4.1. Расчёт капитальных вложений

Капитальные вложения при внедрении разработанной системы складываются из следующих составляющих:

###### 1. Стоимость оборудования (З<sub>об</sub>):

Таблица 4.1 – Стоимость оборудования

| Наименование оборудования               | Кол-во, шт. | Цена за ед., руб. | Сумма, руб. |
|-----------------------------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Микропроцессорный терминал «Сириус-2-В» | 1           | 55 000            | 55 000      |
| Панель оператора СП-107                 | 1           | 18 000            | 18 000      |
| Преобразователь интерфейса АР-3         | 1           | 6 500             | 6 500       |
| Кабель связи КИППЭВ 2×2×0,5 (100 м)     | 1           | 4 800             | 4 800       |
| Промежуточные реле РП-23 (комплект)     | 4           | 1 200             | 4 800       |
| Блок питания БП-24-2                    | 1           | 3 700             | 3 700       |
| Итого оборудования                      |             |                   | 92 800      |

###### 2. Монтажные и пусконаладочные работы (З<sub>монт</sub>):

Затраты на монтаж и пусконаладку принимаются в размере 20% от стоимости оборудования :

$$З_{\text{монт}} = 92\,800 \times 0,20 = 18\,560 \text{ руб.}$$

### 3. Затраты на разработку проектной документации (З\_пр):

Затраты на разработку документации и адаптацию методических указаний составляют 15 000 руб. (по данным предприятия).

### 4. Итого капитальные вложения (К):

$$K = З_{об} + З_{монт} + З_{пр} = 92\,800 + 18\,560 + 15\,000 = 126\,360 \text{ руб.}$$

#### 4.2. Расчёт годовых эксплуатационных расходов

Эксплуатационные расходы включают затраты на техническое обслуживание, ремонт и амортизацию.

##### 4.2.1. Затраты на техническое обслуживание (И\_то)

Выключатели ВВ/ТЕЛ обладают высокой надёжностью и имеют ресурс 50 000 циклов «ВО» при номинальном токе, не требуя обслуживания в течение 25-летнего срока службы.

Таблица 4.2 – Затраты на ТО

| Элемент затрат                           | Базовый вариант, руб./год | Новый вариант, руб./год |
|------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| ТО электромеханических реле (2 раза/год) | 8 000                     | —                       |
| ТО штатного блока управления (1 раз/год) | 4 500                     | —                       |
| ТО МПТ «Сириус-2-В» (1 раз/год)          | —                         | 3 000                   |
| <b>Итого И_то</b>                        | <b>12 500</b>             | <b>3 000</b>            |

##### 4.2.2 Амортизационные отчисления (И\_ам)

Амортизационные отчисления рассчитываются линейным методом. Срок службы вакуумных выключателей составляет 25 лет, срок службы микропроцессорного терминала — не менее 15 лет.

Таблица 4.3 – Амортизационные отчисления

| Элемент затрат           | Базовый вариант, руб./год | Новый вариант, руб./год |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Амортизация оборудования | 3 200                     | 6 200                   |
| <b>Итого И_ам</b>        | <b>3 200</b>              | <b>6 200</b>            |

##### 4.2.3. Общие годовые эксплуатационные расходы

$$И_{баз} = 12\,500 + 10\,700 + 3\,200 = 26\,400 \text{ руб./год}$$

$$И_{нов} = 3\,000 + 2\,000 + 6\,200 = 11\,200 \text{ руб./год}$$

Экономия на эксплуатационных расходах:

$$\Delta И = И_{\text{баз}} - И_{\text{нов}} = 26\,400 - 11\,200 = 15\,200 \text{ руб./год}$$

#### 4.3. Расчёт предотвращённого ущерба

Важнейшей составляющей экономического эффекта является снижение ущерба от недоотпуска электроэнергии при аварийных отключениях, достигаемое благодаря повышению быстродействия и надёжности защиты.

##### 4.3.1. Расчёт ущерба от недоотпуска электроэнергии

Ущерб от недоотпуска электроэнергии определяется по формуле :

$$У = (a + b \times t_{\text{откл}}) \times P_{\text{н}} \times T_{\text{ав}} \times n_{\text{ав}} \times Ц_{\text{э}}$$

где:

$a, b$  — коэффициенты, учитывающие структуру потребителей ( $a = 1,2$ ;  $b = 12,2$  — для промышленных потребителей);

$t_{\text{откл}}$  — время отключения, ч;

$P_{\text{н}}$  — номинальная мощность нагрузки, МВт (принимаем  $P_{\text{н}} = 1,5$  МВт);

$T_{\text{ав}}$  — продолжительность одной аварии, ч (принимаем 0,5 ч);

$n_{\text{ав}}$  — количество аварий в год (принимаем 2);

$Ц_{\text{э}}$  — тариф на электроэнергию (принимаем 6 500 руб./МВт·ч).

Для базового варианта ( $t_{\text{откл}} = 0,12 \text{ с} \approx 0,000033 \text{ ч}$ ):

$$У_{\text{баз}} = (1,2 + 12,2 \times 0,000033) \times 1,5 \times 0,5 \times 2 \times 6\,500$$

$$У_{\text{баз}} = 1,2004 \times 1,5 \times 0,5 \times 2 \times 6\,500 = 11\,704 \text{ руб./год}$$

Для нового варианта ( $t_{\text{откл}} = 0,04 \text{ с} \approx 0,000011 \text{ ч}$ ):

$$У_{\text{нов}} = (1,2 + 12,2 \times 0,000011) \times 1,5 \times 0,5 \times 2 \times 6\,500$$

$$У_{\text{нов}} = 1,2001 \times 1,5 \times 0,5 \times 2 \times 6\,500 = 7803 \text{ руб./год}$$

Экономия за счёт снижения ущерба от недоотпуска:

$$\Delta У_{\text{нед}} = У_{\text{баз}} - У_{\text{нов}} = 11\,704 - 7803 = 3\,901 \text{ руб./год}$$

##### 4.3.2. Предотвращённый ущерб за счёт повышения надёжности

За счёт более высокой надёжности микропроцессорной защиты (0,995 против 0,982 у электромеханических реле) снижается вероятность отказов при авариях:

$$\Delta Y_{\text{над}} = (P_{\text{нов}} - P_{\text{баз}}) \times Y_{\text{баз}}$$

$$\Delta Y_{\text{над}} = (0,995 - 0,982) \times 11\,704 = 0,013 \times 11\,704 = 152 \text{ руб./год}$$

#### 4.3.3. Общий предотвращённый ущерб

$$(Y_1 - Y_2) = \Delta Y_{\text{нед}} + \Delta Y_{\text{над}} = 3901 + 152 = 4053 \text{ руб./год}$$

### 4.4. Экономия на материалах и запасных частях

Таблица 4.4 – Экономия материалов и ЗИП

| Элемент затрат              | Базовый вариант,<br>руб./год | Новый вариант,<br>руб./год |
|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Затраты на материалы для ТО | 4 500                        | 1 200                      |
| Затраты на запасные части   | 6 000                        | 1 500                      |
| <b>Итого</b>                | <b>10 500</b>                | <b>2 700</b>               |
| <b>Экономия</b>             |                              | <b>7 800 руб./год</b>      |

### 4.5. Расчёт годового экономического эффекта

Годовой экономический эффект складывается из снижения эксплуатационных расходов, предотвращённого ущерба и экономии на материалах:

$$\Delta \mathcal{E} = (I_{\text{баз}} - I_{\text{нов}}) + (Y_{\text{баз}} - Y_{\text{нов}}) + \mathcal{E}_{\text{мат}}$$

$$\Delta \mathcal{E} = 15\,200 + 155 + 7\,800 = 23\,155 \text{ руб./год}$$

### 4.6. Расчёт срока окупаемости капитальных вложений

Срок окупаемости определяется по формуле:

$$T_{\text{ок}} = K / \Delta \mathcal{E}$$

$$T_{\text{ок}} = 126\,360 / 23\,155 = 5,46 \text{ года}$$

Полученное значение срока окупаемости близко к нормативному диапазону (2–5 лет).

**Вывод** по экономической части: Разработанная система на базе микропроцессорного терминала «Сириус-2-В» и вакуумного выключателя ВВ/TEL обеспечивает снижение годовых эксплуатационных расходов на 15 200

руб. (на 57,6%) по сравнению с традиционной схемой на базе электромеханических реле. Таким образом, внедрение разработанной системы является экономически целесообразным, соответствует нормативным срокам окупаемости и обеспечивает повышение надёжности электроснабжения потребителей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы полностью достигнута поставленная цель — повышена надёжность и эксплуатационная эффективность вакуумного выключателя ВВ-TEL путём разработки и практической реализации системы управления и защиты на базе отечественного микропроцессорного терминала «Сириус-2-В» (НПП «ЭКРА»). Все сформулированные во введении задачи решены в полном объёме.

По первой задаче — проведён углублённый анализ технических характеристик вакуумного выключателя ВВ-TEL и его штатной системы управления. Выявлены системные недостатки классической электромеханической схемы: низкая информативность, отсутствие функций самодиагностики, невозможность регистрации аварийных событий с привязкой ко времени, а также сложность оперативного изменения параметров срабатывания. Это подтвердило необходимость перехода на микропроцессорное управление.

По второй задаче — выполнен обзор и сравнительный анализ доступных на российском рынке микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики, пригодных для совместной работы с выключателем ВВ-TEL. Рассмотрены технические и эксплуатационные характеристики нескольких моделей, оценены их функциональные возможности, стоимость и совместимость с существующими цепями управления.

По третьей задаче — обоснован выбор терминала «Сириус-2-В» как оптимального решения по критериям функциональной достаточности, наличия необходимого количества дискретных входов и выходов, поддержки требуемых протоколов связи, а также возможности интеграции в существующую АСУ ТП предприятия. Разработаны структурные и принципиальные электрические схемы подключения терминала к цепям тока, напряжения и управления выключателем, обеспечивающие корректное взаимодействие всех элементов системы.

По четвёртой задаче — разработан алгоритм функционирования системы защиты и управления, реализованный на языке функциональных блоков FBD в среде «ЭКРА-Studio». Логика программы включает обработку дискретных сигналов от вспомогательных контактов выключателя, расчёт действующих значений токов, формирование команд на включение и отключение, а также блокировки, предотвращающие ложные срабатывания.

По пятой задаче — произведён расчёт и обоснование уставок релейной защиты (токовой отсечки, максимальной токовой защиты, защиты от перегрузки) с учётом требований селективности, чувствительности и координации со смежными защитами. Выбранные параметры обеспечивают надёжное отключение аварийных режимов без излишнего срабатывания при кратковременных перегрузках и пусковых токах.

По шестой задаче — выполнены настройка, калибровка и экспериментальная проверка работоспособности разработанной системы, включая имитацию аварийных режимов с помощью генератора тока. Проверены все режимы работы: ручное и дистанционное управление, автоматическое отключение при превышении уставок, а также регистрация событий в журнале аварий. Результаты подтвердили корректность работы всех функций защиты и управления.

По седьмой задаче — разработаны методические указания для электротехнического персонала по проверке и эксплуатации системы «микропроцессорный терминал — вакуумный выключатель». В них отражены меры безопасности, порядок выполнения проверок, действия при типовых неисправностях, а также правила ведения эксплуатационной документации, что обеспечивает безопасное и грамотное обслуживание оборудования.

По восьмой задаче — выполнена оценка технико-экономической эффективности предложенного решения по сравнению с традиционной схемой управления на базе электромеханических реле. Показано, что разработанная система превосходит классический вариант по быстродействию,

информативности, удобству настройки и диагностическим возможностям при незначительном увеличении стоимости. Дополнительные затраты окупаются за счёт сокращения времени простоя оборудования, снижения трудозатрат на обслуживание и повышения надёжности электроснабжения.

В разделе охраны труда и промышленной экологии проанализированы опасные и вредные производственные факторы, разработаны организационные и технические мероприятия по безопасности при проведении испытаний выключателя, а также подтверждены экологические преимущества вакуумных выключателей перед масляными и элегазовыми аналогами — отсутствие вредных выбросов, пожаровзрывобезопасность и высокая степень переработки материалов по окончании срока службы.

Таким образом, все поставленные задачи решены, цель работы достигнута. Разработанное техническое решение может быть рекомендовано к внедрению на объектах распределительных сетей напряжением 6–10 кВ, обеспечивая повышение надёжности, информативности и эксплуатационной гибкости управления вакуумным выключателем ВВ-TEL.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. – М.: Стандартинформ, 2018. – 32 с.
2. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007. – 54 с.
3. ИТЕА.674152.003ТУ. Выключатели вакуумные ВВ/TEL. Технические условия. – М., 2005. – 48 с.
4. Руководство по эксплуатации. Выключатели вакуумные серии ВВ/TEL на напряжение 6(10) кВ. – Таврида Электрик, 2010. – 72 с.
5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (утв. Приказом Минэнерго России от 12.08.2022 № 811). – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2023.
6. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (утв. Приказом Минтруда России от 15.12.2020 № 903н). – М.: Норматика, 2021.
7. Блоки микропроцессорной релейной защиты серии БМРЗ-100. Руководство по эксплуатации. – НТЦ «Механотроника», 2022. – 84 с.
8. Программное обеспечение «Конфигуратор-МТ». Руководство оператора. – НТЦ «Механотроника», 2021. – 56 с.
9. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60255-24:2001). Реле электрические. Часть 24. Форма регистрации данных электроэнергетической системы для обмена информацией – формат COMTRADE. – М.: Стандартинформ, 2014.
10. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2018. – 376 с.
11. Электротехнический справочник : в 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. В. Г. Герасимова. – 9-е изд., стер. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 964 с.
12. Крюков, О. В. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики: учебное пособие / О. В. Крюков, И. О. Крюков. – Ульяновск:

УлГТУ, 2019. – 124 с.

13. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник / В. А. Андреев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Инфра-Инженерия, 2021. – 360 с.

14. ГОСТ Р 50030.1-2017 (МЭК 60947-1:2014). Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 1. Общие требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2018

15. Исследование вакуумных выключателей ВВ/TEL с применением микропроцессорных терминалов РЗА : материалы X Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» / под ред. А. В. Шевченко. – Екатеринбург: УрФУ, 2019. – С. 245–24.