

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра Электроснабжение и электротехника

(наименование)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Цифровые технологии в электроэнергетике

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Внедрение релейной защиты с применением цифровых устройств на
трансформаторной подстанции автомобильного завода

Обучающийся

В.А. Алланов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент С.В. Шаповалов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

А.В. Прошина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

В выпускной квалификационной работе представлена разработка внедрения релейной защиты с применением цифровых устройств на трансформаторной подстанции автомобильного завода.

Выполнен анализ строения релейной защиты и автоматики на объекте практики: приведены электротехнические схемы и рассмотрены установленные ЭМ устройства РЗА. Рассмотрены трудности, которые могут возникнуть при реконструкции, а также плюсы и минусы микропроцессорной РЗА по сравнению с электромеханическими аналогами. Приведена методика расчета релейной защиты распределительных сетей 10 кВ, а также выполнен типовой расчет релейной защиты для отходящих линий, включающий в себя определение сопротивления линии, определение трехфазного и двухфазного тока короткого замыкания, а также вычисления уставок, необходимых для ввода в блок микропроцессорной релейной защиты БМРЗ от НТЦ «Механатроника», который устанавливается в шкаф типа ШЭ-МТ-015. Обоснован выбор блока БМРЗ-50-2-3-02, а также представлены его электрические и схемы.

Бакалаврская работа включает пояснительную записку объемом 61 страница с 8 таблицами и 28 рисунками, список из 20 использованных источников (включая 5 на английском языке), а также графическую часть, состоящую из 6 листов формата А1.

Abstract

The final thesis presents the development of the implementation of relay protection using digital devices at a transformer substation of an automobile plant.

The analysis of the structure of relay protection and automation at the practice facility is performed: electrical circuits are presented and the installed EM devices of the RPA are considered. The difficulties that may arise during reconstruction, as well as the pros and cons of microprocessor-based REA in comparison with electromechanical analogues, are considered. A method for calculating the relay protection of 10 kV distribution networks is presented, and a typical calculation of relay protection for outgoing lines is performed, which includes determining the line resistance, determining the three-phase and two-phase short-circuit current, as well as calculating the setpoints required for input into the BMRZ microprocessor relay protection unit from STC Mechanatronics, which is installed in a cabinet. type SHE-MT-015. The choice of the BMRZ block is justified-50-2-3-02 , as well as its electrical and circuit diagrams.

The bachelor's thesis includes a 61-page explanatory note with 8 tables and 28 figures, a list of 20 sources used (including 5 in English), as well as a graphic part consisting of 6 A1 sheets.

Содержание

Введение	5
1 Анализ объекта практики	7
1.1 Роль ГПП №3 АО «АвтоВАЗ» в энергоснабжении предприятия	7
1.2 Строение РЗА на объекте модернизации	14
1.3 Карта уставок ГПП-3	17
2 Обоснование необходимости модернизации объекта практики	22
2.1 Положение РЗ в энергосистеме	22
2.2 Причины, определяющие необходимость реконструкции релейной защиты на ГПП-3	23
3 Релейная защита распределительных сетей 10 кВ	30
3.1 Токовые защиты распределительных сетей	30
3.2 Времятоковые характеристики блоков БМРЗ	31
3.3 Согласование по току	37
3.4 Согласование по времени	39
3.5 Обоснование выбора МП защиты	46
3.6 Расчет релейной защиты для отходящих линий 10 кВ	53
Заключение	58
Список используемой литературы и используемых источников	59

Введение

Электроэнергетика является составной частью топливно-энергетического комплекса России. Она объединяет все процессы производства, преобразования и потребления электроэнергии, а также является одной из основ экономики. Современная электроэнергетика развивается быстрыми темпами, однако рост энергопотребления предъявляет повышенные требования к работе энергосистем. Ключевыми требованиями являются высокая надежность, бесперебойность электроснабжения и устойчивость к внешним воздействиям. При этом аварийные ситуации в работе электрооборудования могут возникать как вследствие природных факторов, так и из-за человеческого фактора – ошибок обслуживающего персонала. В таких случаях наблюдаются значительные отклонения рабочих параметров от нормативных значений. Для своевременного выявления аварийных режимов, оперативного управления энергосистемой и локализации повреждений применяются специализированные устройства релейной защиты и автоматики. В последние годы наблюдается активное внедрение микропроцессорных технологий в релейной защите, что позволяет постепенно заменять устаревшие электромеханические устройства более совершенными цифровыми аналогами с улучшенными характеристиками. К основным достоинствам и недостаткам микропроцессорных устройств релейной защиты относят:

- улучшенные показатели быстродействия, чувствительности и надежности по сравнению с электромеханическими аналогами;
- наличие таких сервисных функций, как регистрация и осциллографирование сигналов, самодиагностика и возможность интеграции МП РЗА в автоматизированную систему управления технологическим процессом;

- более высокая стоимость и неремонтопригодность, ведь вышедший из строя блок управления экономически более выгодно заменить целиком на новый.

Целью данной работы является повышение надежности и безопасности релейной защиты распределительных сетей 10 кВ на ГПП №3 Тольяттинского автомобильного завода АО «АвтоВАЗ» с внедрением микропроцессорной техники. Реконструкция будет направлена на повышение надежности энергоснабжения и снижение аварийных ситуаций. С внедрением нового оборудования нагрузка на электросеть возрастает, и потребность в стабильном и качественном энергоснабжении становится критически важной. Любой сбой может привести к дорогостоящим простоям, а ремонт или замена оборудования негативно повлияют на бюджет предприятия.

Задачи, выполнение которых необходимо для достижения цели:

- анализ текущего состояния РЗА и оценка работоспособности существующих систем защиты и автоматики, установленных на главной понизительной подстанции №3 АО «АвтоВАЗ»;
- выявление причин сбоев – определение факторов, приводящих к некорректной работе защиты, и поиск путей увеличения надежности работы системы;
- расчет электрических параметров: вычисление токов короткого замыкания (КЗ) и настройка релейной защиты для оптимального срабатывания.

1 Анализ объекта практики

1.1 Роль ГПП №3 АО «АвтоВАЗ» в энергоснабжении предприятия

Главная понизительная подстанция глубокого ввода №3, принадлежащая АО «АвтоВАЗ», была введена в эксплуатацию в 1997 году.

Электроснабжение подстанции осуществляется от ТЭЦ Волжского автозавода по воздушной линии ВДН-2, которая подключена к первому трансформатору с напряжением 110 кВ. Трансформаторы №2 и №3 соединены с кабельными линиями ВА3-62 и ВА3-63. В таблице 1 представлены технические характеристики трансформаторов типа ТРДН 63000/110.

Таблица 1 – Свойства трансформаторов

Трансформатор, марка	Номинальная мощность, Вт	Номинальное напряжение, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Потери, кВт		Напряжение к.з., %	Ток х.х., %
		ВН	НН		х.х.	к.з.		
ТРДН-63000/110	63000	115	6,3-11,0	Y _н /D-D-11-11	35,0	245,0	10,5	0,25

Электроэнергия напряжением 10 кВ с ГПП-3 распределяется между цеховыми объектами, включая инструментальное производство, сварочный участок и другие западные подразделения завода. Основная нагрузка приходится на цех 18/4, где расположены печи для термообработки и закалки деталей. К числу ключевых энергопотребителей также относятся участки по выпуску механизированного и режущего инструмента, зона гальванических покрытий и термический цех.

Рост производства и установка нового оборудования неизбежно увеличивают потребление энергии и риски аварий. Устаревшая релейная защита не обеспечивает должный уровень надежности.

В 2009 году было решено ввести в эксплуатацию дополнительный третий силовой трансформатор ТРДЦН 63000/110/10, оснащённый современной микропроцессорной защитой производства АВВ, тогда как на двух других трансформаторах сохранили прежнюю электромеханическую защиту.

На отходящих линиях 10 кВ внедрили комплекс защитных систем, включая:

- контроль замыканий на землю;
- максимально-токовую защиту (МТЗ);
- защиту секционных выключателей;
- токовую отсечку (ТО);

Пониженное напряжение 10 кВ с ГПП-3 110 кВ расходиться на следующие распределительные пункты: РП-1, РП-3, РП-4, РП-13, РП-19, РП-33. Для понимания какого характера устройства питаются от ГПП-3 был проведен подробный анализ ряда распределительных пунктов, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Ряд потребителей ГПП №3

Источник питания	Наименование потребителя	Тип	Мощность	Напряжение	Количество
РП-19	Печь тигельная плавильная №№ 1; 3; 4; 5; 6.	GSA-5/A	1800/1500 кВА	10000 В	5
РП-4	насосы №№ 1; 2; 3.	12ГРК-8	630кВт		3
РП-13	Компрессоры: А-11, А-43	«Атлас»	1325 кВт		2
	А-42, А-44	«Атлас»	1230 кВт		2
	К37	К-345-91-1	3500 кВт		1
	К38	К-345-91-1	3150 кВт		1
	И32, И33	К702А, К702В	1500 кВт		2
	И31, И35, И34, И36	К801А, В, D	2100 кВт		4

Система РП-19, питающая эти печи от ячеек 47 и 67, представляет собой сложную электротехническую систему, включающую в себя трансформаторы,

выключатели, системы защиты от перегрузок и коротких замыканий, а также системы мониторинга и управления. Надежная работа РП-19 крайне важна для бесперебойного функционирования всего металлургического производства. Отказы в энергоснабжении могут привести к остановке производства, повреждению оборудования и значительным финансовым потерям. Указанные 5 тигельных печей, являющиеся основными потребителями энергии в рамках системы, представляют собой специализированный тип дуговых печей, используемый для плавки партий высококачественного металла, часто с применением специальных защитных атмосфер. Эти печи характеризуются высокой точностью контроля температуры и состава расплава, что позволяет получать металл с заданными свойствами. Тигельные печи, в отличие от больших открытых дуговых печей, минимизируют потери металла и легирующих элементов за счет ограниченного контакта расплава с атмосферой. Системы автоматизации и контроля параметров процесса в современных тигельных печах позволяют значительно повысить эффективность и воспроизводимость результатов плавки. Энергопотребление этих печей, хотя и меньше, чем у крупных дуговых печей, все равно достаточно значительно и требует мощного и надежного источника питания. Схема РП-19 представлена на рисунке 1.

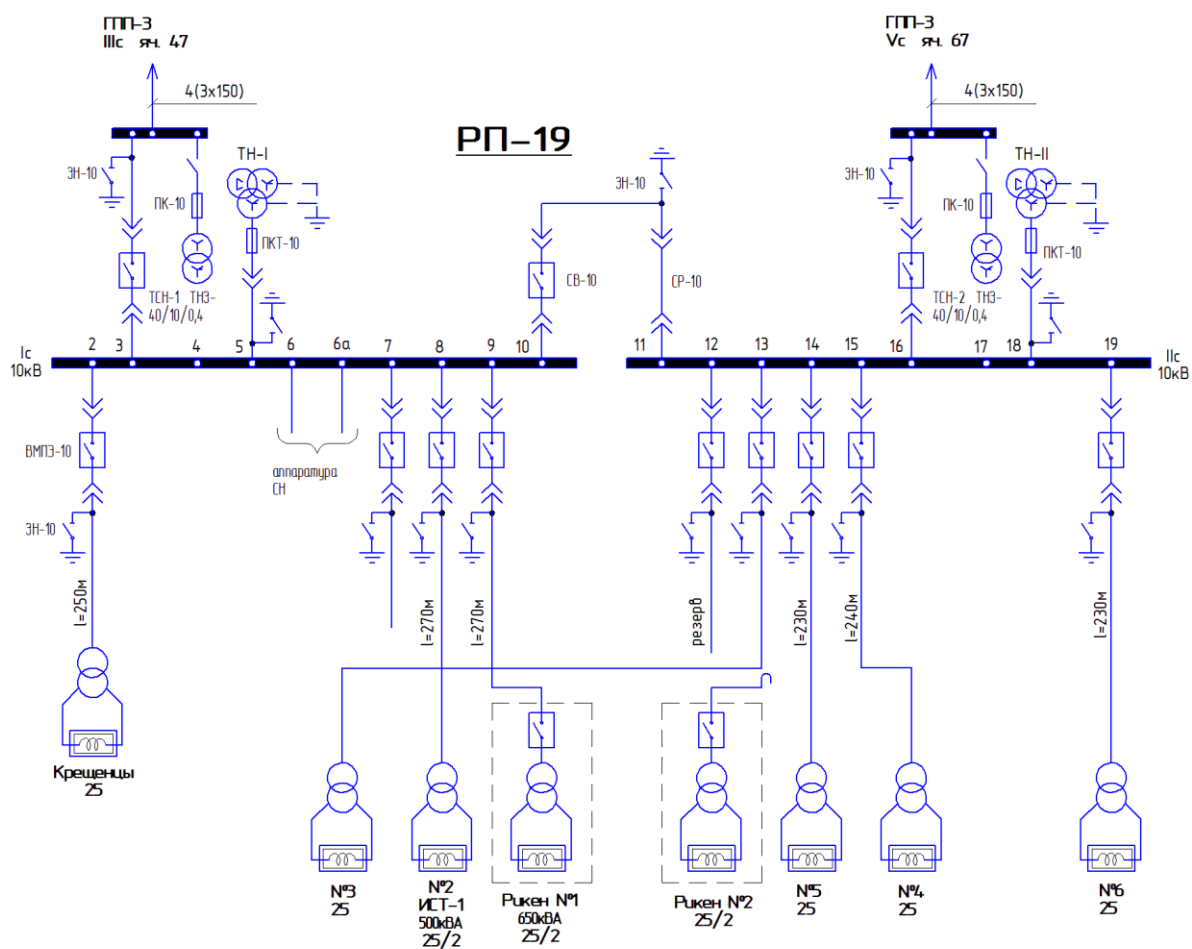


Рисунок 1 – Схема РП-19

РП-4 получает питание от ячеек 34 и 86. Основными приемниками на РП-4 являются три насоса типа 12ГРК-8 с номинальной мощностью 630 кВт каждый. Надежная защита этого оборудования крайне важна, так как в процессе обработки металлов и производства оно используется на всех этапах технологического процесса. Схема РП-4 представлена на рисунке 2.

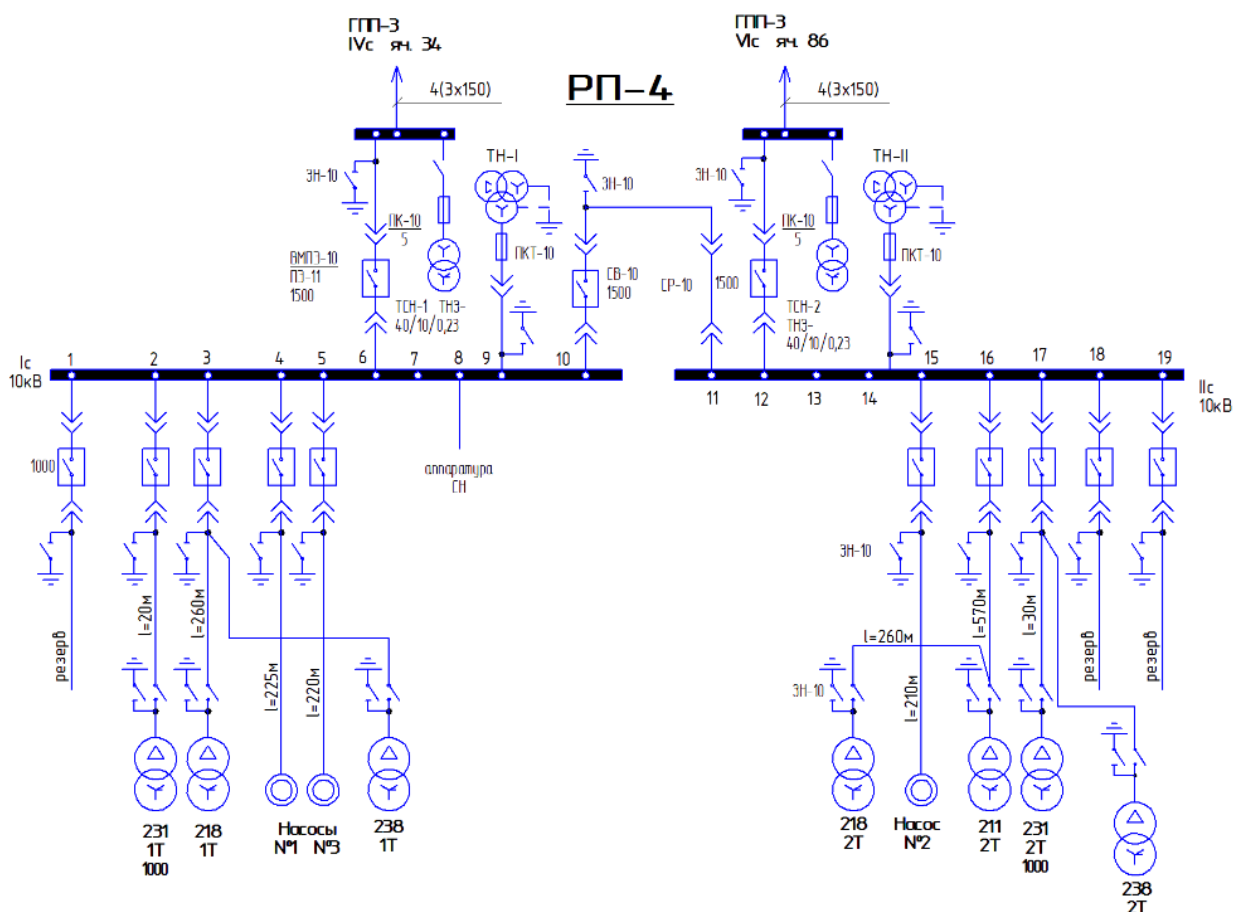


Рисунок 2 – Схема РП-4

РП-13 располагает высокой гибкостью в распределении нагрузки благодаря тому, что к нему подключены компрессоры различных типов и мощностей. Использование ячеек 64 и 36 обеспечивает питание всех агрегатов, что особенно важно в условиях постоянно меняющихся производственных требований. Высокая мощность компрессоров, таких как K37 и K38, может эффективно справляться с большими объемами сжатого воздуха, а компрессоры «Атлас» (А-41 и А-42) с мощностью 1325 кВт и А-43, А-44 - 1230 кВт обеспечивают стабильный поток сжатого воздуха, что критично для поддержания производственной линии. Данные компрессоры отличаются высокой надежностью и эффективностью, что сокращает простои и увеличивает производительность. Установленное оборудование «Ингерсол-

Ренд»: модели K702A и K702B с мощностью 1500 кВт, а также более мощные K801A, C, B, D 2100 кВт. Эти компрессоры сочетают имеют высокую производительность и простое обслуживанием. Благодаря современным технологиям они снижают энергозатраты и повышают КПД компрессорной системы. Схема РП-13 представлена на рисунке 3

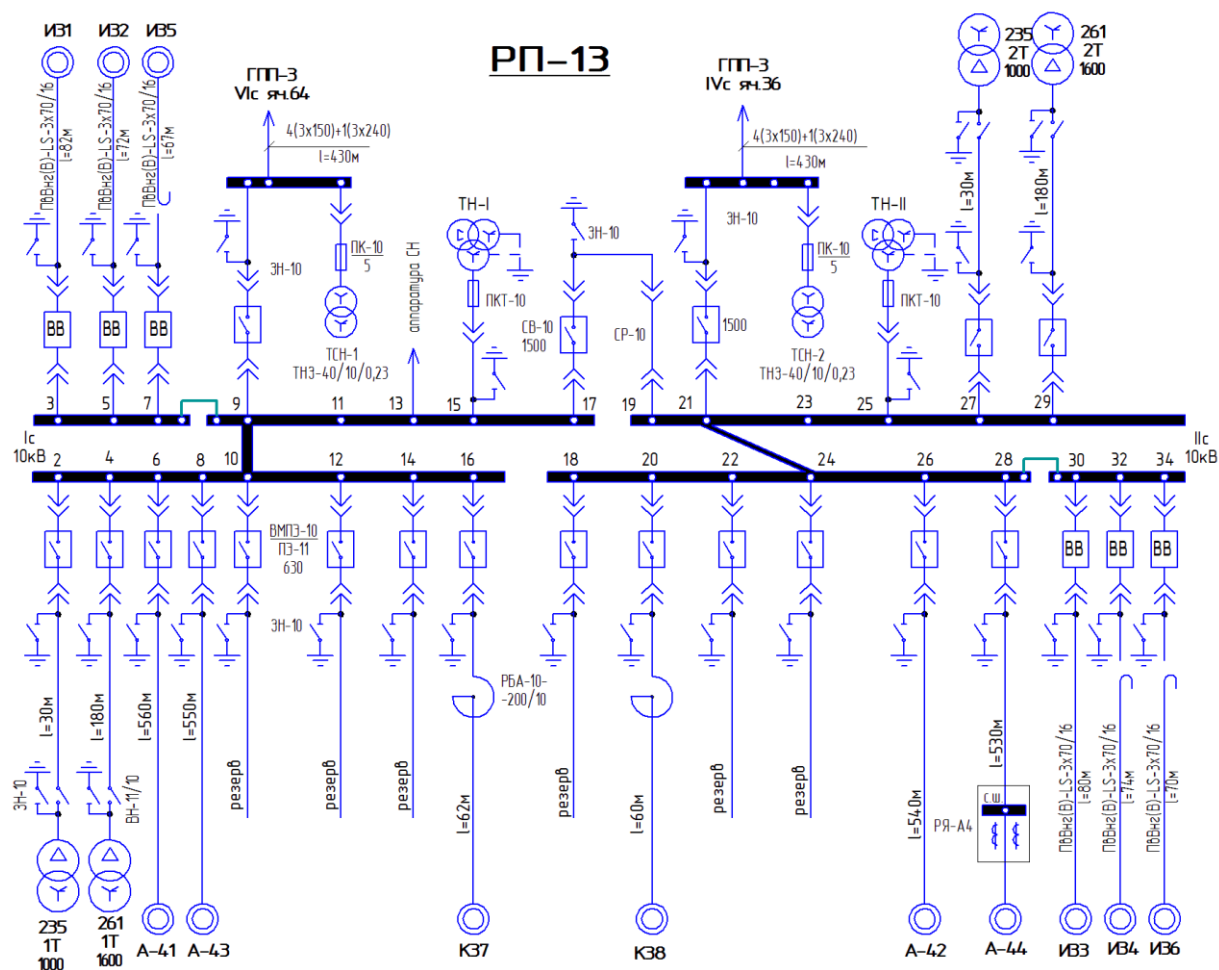


Рисунок 3 – Схема РП-13

Общая схема ГПП-3 представлена на рисунке 4

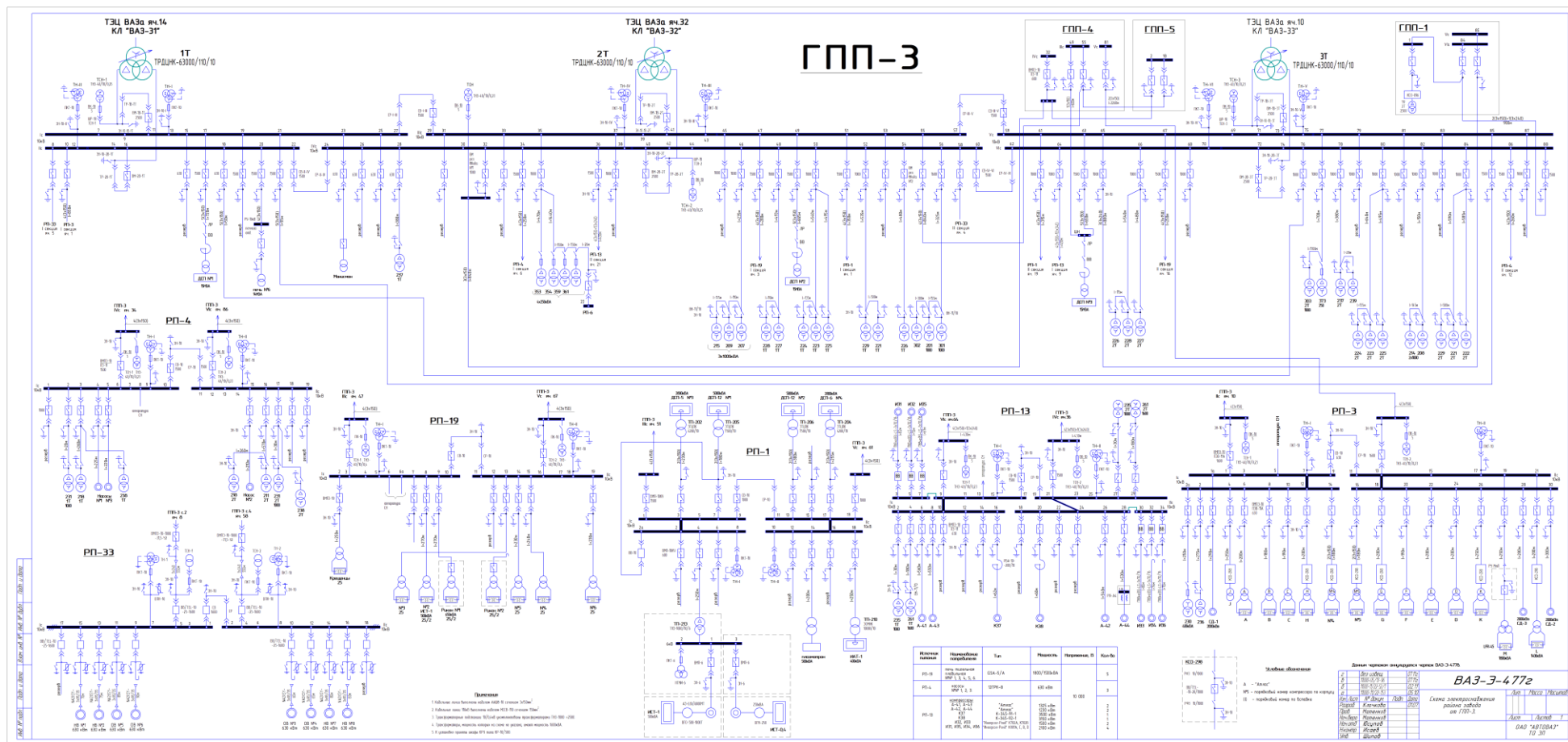


Рисунок 4 – Схема ГПП-3

1.2 Строеение РЗА на объекте модернизации

Ниже, детализированы различные электромеханические устройства, используемые в релейной защите и автоматике на ГПП-3. Каждый из этих элементов выполняет специфические функции работу электрических систем. Ключевыми характеристиками устройств являются их чувствительность, время срабатывания и возможность настройки под конкретные условия эксплуатации.

Реле тока РТ-40 предназначены для применения в схемах релейной защиты и автоматике энергетических систем в качестве органа, реагирующего на повышение тока [10]. Все элементы схемы реле смонтированы внутри корпуса, состоящего из основания (цоколя) и съемного прозрачного кожуха. Используемые реле тока представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Реле тока серии РТ-40

Наименование	Пределы уставки на ток срабатывания реле, А		Номинальный ток, А		Потребляемая мощность при токе минимальной уставки, ВА, не более
	соединение катушек		соединение катушек		
	последовательное	параллельное	последовательное	параллельное	
	1 диапазон	2 диапазон	1 диапазон	2 диапазон	
РТ-40/10	2,5-5,0	5,0-10,0	16	16	0,5
РТ-40/20	5,0-10,0	10,0-20,0	16	16	0,5
РТ-40/06	0,15-0,3	0,3-0,6	1,6	2,5	0,2
РТ-40/50	12,5-25,0	25,0-50,0	16	16	0,8
РТ-40/6	1,5-3,0	3,0-6,0	10	16	0,5

Реле промежуточные предназначены для одновременного управления двумя электрическими цепями, независимыми друг от друга. Они дают возможность подключать различное промышленное оборудование, в том числе работающее как на переменном токе, так и на постоянном токе [12]. Используемые промежуточные реле представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Промежуточные реле

Наименование	Рабочее напряжение, В		Диапазон чувствительности, А	Напряжение срабатывания, В		Напряжение срабатывания, %Uном
	перемен. тока	пост. тока		перемен. тока	пост. тока	
РП-12	36-200	-	0,07-6	24-240	24-240	85
РП-25	36-200	-	0,07-6	24-240	24-240	75
РП-256	36-200	-	0,07-6	24-240	24-240	75
РП-23	-	12-230	0,07-3	24-240	24-240	85
РП-252	-	24-230	0,07-3	24-240	24-240	80

Реле напряжения предназначены для контроля уровня напряжения в электрической сети и защиты электрического оборудования от отклонений напряжения от нормы. При выходе напряжения за установленные пределы реле автоматически отключает питание, предотвращая повреждение подключённых приборов [11]. Используемые реле напряжения представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Реле напряжения

Наименование	Исполнение реле по характеру изменения входной воздействующей величины	Номинальное напряжение, В		Напряжение срабатывания, В		Коэффициент возврата	Род тока
		1 диапазон	2 диапазон	1 диапазон	2 диапазон		
РН-54/160	минимальное	100	200	40-80	80-160	не более 1,25	переменный ток частоты 50 и 60 Гц
РН-53/60	максимальное	30	60	15-30	30-60	не менее 0,8	
РН-51/1,4		6	12	0,7	1,4	не менее 0,5	постоянный ток частоты 50 и 60 Гц
РН-51/6,4		24	60	3,2	6,4		
РН-51/32		48	100	16	32		

Используемые реле времени представлены в таблице 6

Таблица 6 – Реле времени

Наименование	Тип реле	Управляющее воздействие	Род тока	Номинальное рабочее напряжение, В	Выдержка времени, с
ЭВ-248	с часовым механизмом, постоянного оперативного тока	подача напряжения питания	переменный	100, 110, 127, 220, 380	1-20
ЭВ-238					0,5-9
ЭВ-123			постоянный	24, 48, 110, 127, 220	0,25-3,5
ЭВ-134					0,5-9

Реле времени применяется в случаях, когда необходимо выполнить какое-то действие не сразу после появления управляющего сигнала, а через установленный промежуток времени [9].

1.3 Карта уставок ГПП-3

Карта уставок – это специализированный инструмент, предназначенный для инженеров-энергетиков, который помогает структурировать и наглядно отображать основные параметры функционирования устройств РЗА. На ней фиксируются настройки защитных реле, временные интервалы срабатывания и логика работы автоматики, что упрощает мониторинг состояния оборудования и ускоряет принятие решений. Графическое отображение данных способствует лучшему анализу работы защитных систем и линий электропередачи.

Актуальные данные, занесённые в карту уставок, играют ключевую роль при проверке допустимых режимов эксплуатации электрооборудования. Это особенно критично при колебаниях нагрузки и возникновении нештатных ситуаций. Благодаря оперативному доступу к информации специалисты могут быстро обнаруживать отклонения от нормы и вносить корректировки, снижая вероятность аварий.

На рисунке 5 представлена карта уставок первой секции ГПП-3.

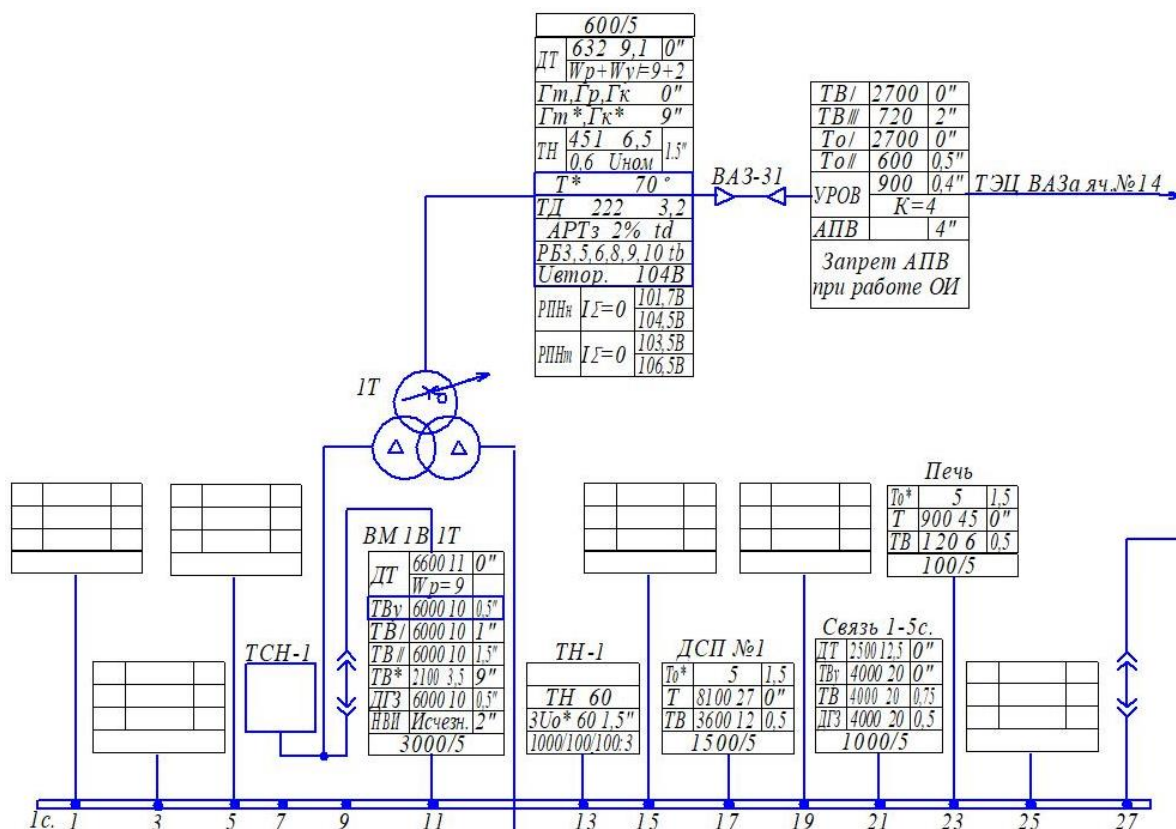


Рисунок 5 – Карта уставок 1 секции ГПП-3

На рисунке 6 представлена карта уставок второй секции ГПП-3.

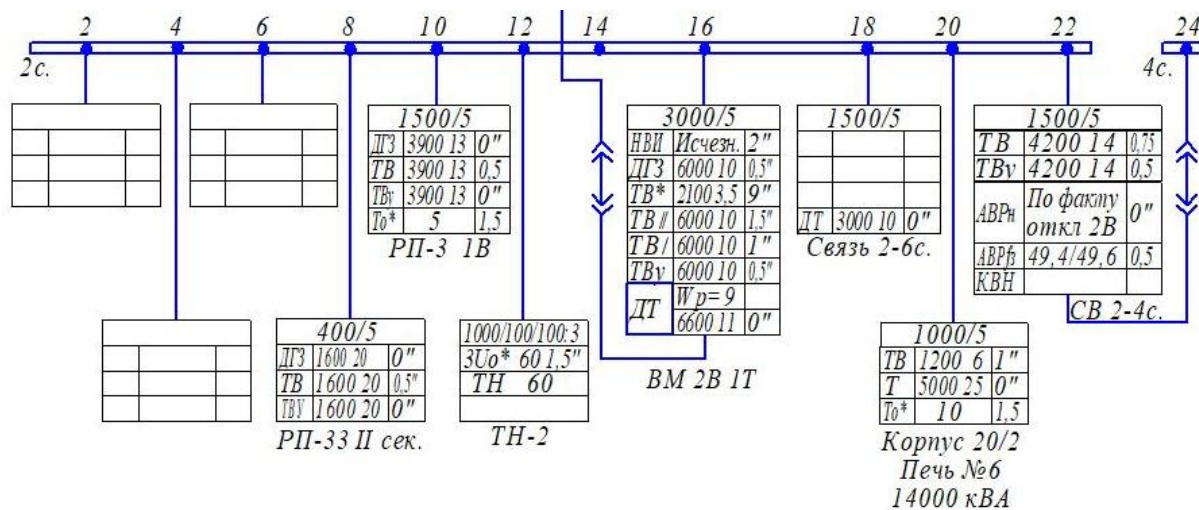


Рисунок 6 – Карта уставок 2 секции ГПП-3

На рисунке 7 представлена карта уставок третьей секции ГПП-3.

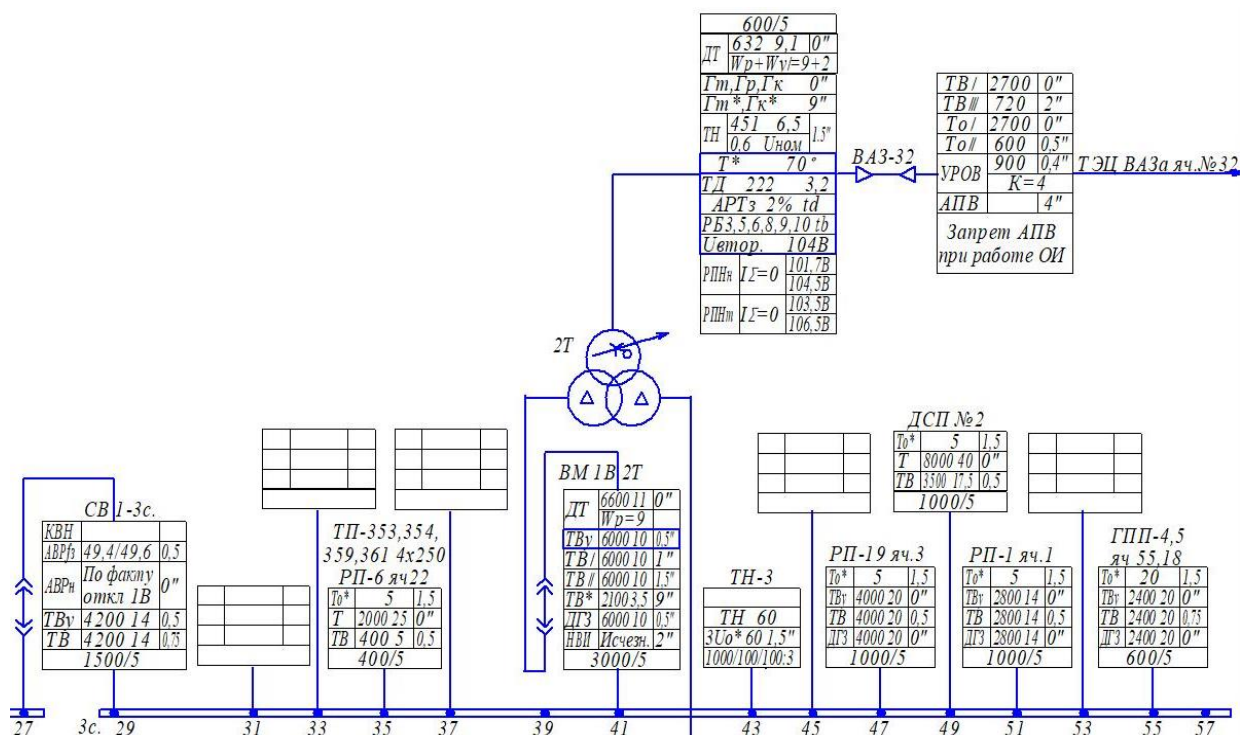


Рисунок 7 – Карта уставок 3 секции ГПП-3

На рисунке 8 представлена карта уставок четвертой секции ГПП-3.

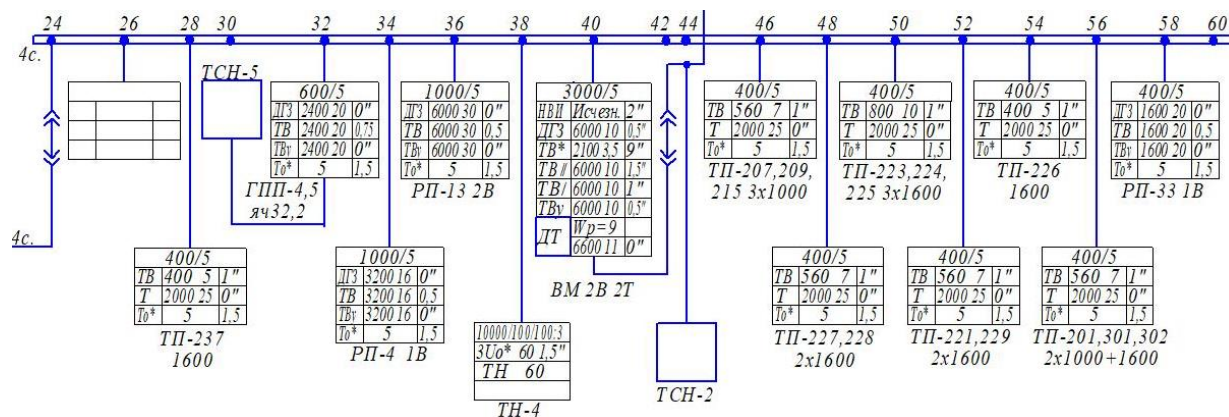


Рисунок 8 – Карта уставок 4 секции ГПШ-3

На рисунке 9 представлена карта уставок пятой секции ГПП-3.

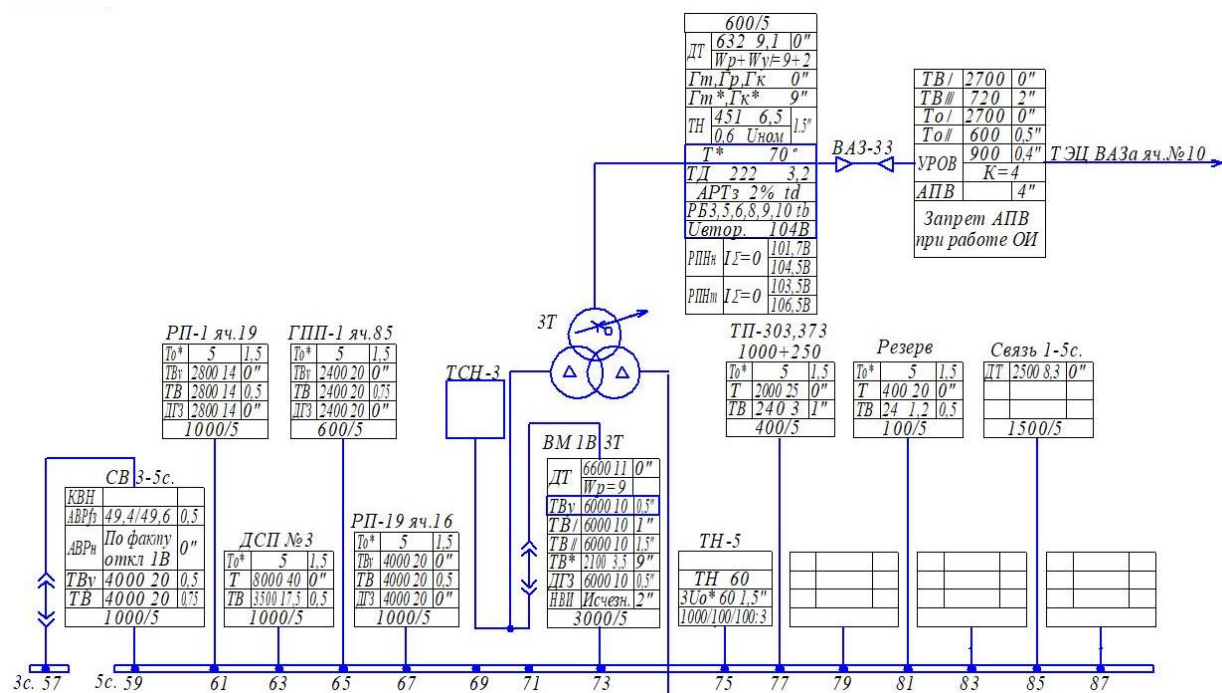


Рисунок 9 – Карта уставок 5 секции ГПП-3

На рисунке 10 представлена карта уставок шестой секции ГПП-3.

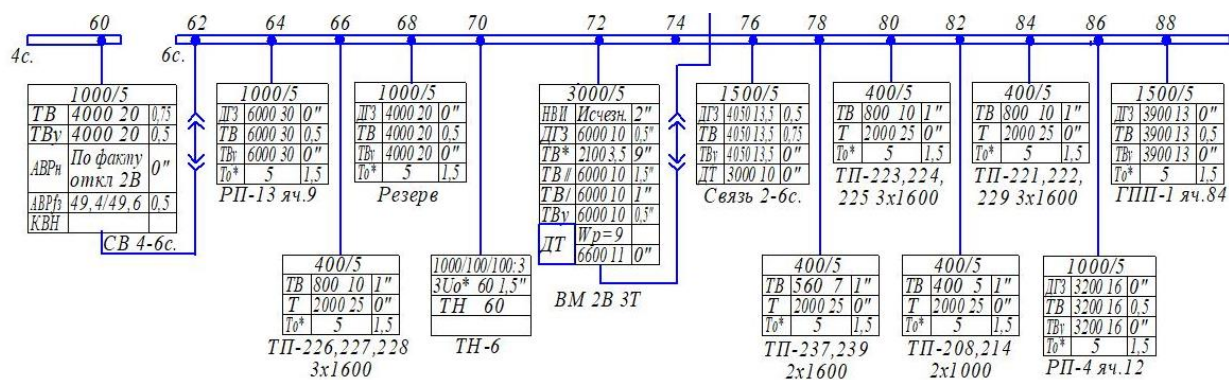


Рисунок 10 – Карта уставок 6 секции ГПП-3

Для того, чтобы прочесть карты уставок необходимо знать расшифровку написанных условных обозначений, информация о них представлена на рисунке 11.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.

ДТ - дифференциальная токовая защита.
Гт,Гр,Гк- газовая защита тр-ра,РПН,кабеля 110 кВ на отключение.
Гт,Гк* - газовая защита тр-ра,кабеля 110 кВ на сигнал.*
ТН - МТЗ с блокировкой по минимальному напряжению.
РБ - режим БАР (положение штеккеров блока БАР).
ТВ- защита от перегруза с действием на сигнал.*
Т° - сигнализация перегрева масла тр-ра.
Д - автоматическое включение дутья.
АВРfз - запрет АВР при снижении частоты в системе.
АВРн - автоматическое включение резерва по напряжению.
КВН - контроль встречного напряжения.
РПНт - регулирование напряжения под нагрузкой с блокировкой по максимальному току.
РПНн - регулирование напряжения под нагрузкой с блокировкой по минимальному напряжению.
АРТз - зона нечувствительности автоматического регулятора напряжения тр-ра.
Т - токовая отсечка.
ТВ - независимая максимальная токовая защита.
ТВу - независимая максимальная токовая защита с ускорением.
УРОВ - устройство резервирования отказа выключателя.
То - защита от замыканий на землю с действием на отключение.
То - защита от замыканий на землю с действием на сигнал.*
3Uo - защита от замыканий на землю с действием на сигнал.*
ДГЗ - дугозащита.
НВИ - индивидуальная защита минимального напряжения.
Уетор.- уставка по напряжению блока БАР.
ІГ - ток нагрузки по стороне низшего напряжения тр-ра.
td - уставка времени ДТ.
tb - уставка времени БАР.
ж - чувствительность контроля изоляции.
ТД - включение охлаждения трансформатора по току.

Рисунок 11 – Условные обозначения элементов карт уставок ГПП-3

Вывод. Рассмотрена ГПП-3 АО «АвтоВАЗ», ее основные потребители, установленная электромеханическая релейная защита и карта уставок. Вся ранее рассмотренная информация пригодится в последующих разделах.

2 Обоснование необходимости модернизации объекта практики

2.1 Положение РЗ в энергосистеме

Релейная защита — это жизненно важная система в электроэнергетических системах (ЭЭС), обеспечивающая быстрое и избирательное отключение поврежденных участков сети, предотвращая масштабные аварии и обеспечивая надежность энергоснабжения. Ее эффективность определяется тремя ключевыми свойствами: селективностью, быстродействием и чувствительностью [7].

Рассмотрим каждое свойство детально. Селективность — это способность релейной защиты точно идентифицировать и отключить только поврежденный элемент ЭЭС, оставляя исправные части системы в работе. Это свойство критически важно для минимизации масштабов аварий и обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей. Различают абсолютную и относительную селективность. Защита с абсолютной селективностью срабатывает только при повреждениях внутри своей зоны ответственности. Это идеальный, но не всегда достижимый сценарий.

Чтобы обеспечить точное срабатывание защиты, применяют высокоточные датчики, сложные алгоритмы анализа данных и расчёты, учитывающие параметры сети (сопротивление, индуктивность, ёмкость). Однако идеальная селективность не всегда возможна из-за погрешностей измерений, влияния соседних цепей и сложной структуры сети [16].

Относительная селективность допускает срабатывание защиты при авариях в смежных зонах. Для чёткого отключения нужного участка используют временные задержки. Если повреждение попадает в зону нескольких защит, ближайшая срабатывает первой, отключая аварийный участок. Задержки тщательно настраивают, чтобы избежать массовых отключений.

Современные цифровые реле поддерживают сложные алгоритмы, включая адаптацию к изменениям в сети. Они анализируют данные с датчиков, определяют место повреждения и выбирают оптимальный способ отключения.

Быстродействие – время от появления неисправности до её устранения. Чем оно меньше, тем ниже риск распространения аварии. Современные системы работают за миллисекунды благодаря:

- быстрой обработке данных в реле;
- скорости срабатывания выключателей;
- использованию оптоволокну для передачи сигналов;
- правильного выбора типа защиты.

Чувствительность – способность защиты обнаруживать даже слабые повреждения. Она определяется минимальным током или напряжением, при которых срабатывает защита. Высокая чувствительность важна при малых нагрузках, но её избыток может вызвать ложные отключения. Современные алгоритмы фильтрации шумов и адаптации помогают находить баланс.

Технологии ИИ и машинного обучения позволяют анализировать данные, выявлять аномалии и прогнозировать аварии, повышая надёжность защиты [20].

Эффективная релейная защита требует точной настройки и постоянного контроля. Оптимальное сочетание селективности, быстродействия и чувствительности предотвращает крупные аварии. Развитие технологий делает энергосистемы более устойчивыми.

2.2 Причины, определяющие необходимость реконструкции релейной защиты на ГПП-3

Установленная на ГПП-3 релейная защита и автоматика, выполненная на аналоговых электромеханических реле, морально и физически устарела. Согласно нормативному документу РД 153-34.0-35.648-2001, нормативный

срок службы устройств РЗА составляет 12 лет. Действительный срок службы явно превышает установленный, о чем говорит и ее внешний вид: состояние ячеек, проводов, и т. п. Рассмотрим основные аспекты микропроцессорной релейной защиты, призванной стать заменой электромеханической РЗА:

«Достоинства МП РЗА:

- многозадачность – функционально один микропроцессорный терминал РЗА способен вобрать в себя целый набор всевозможных реле, сложную логическую схему и множество выходных реле (исполнительных органов). Наполнение защитами может быть настолько большим, что можно уже говорить о централизованной защите, охватывающей целое распределительное устройство. Во многих отношениях это несомненное благо, но многофункциональность снижает надёжность системы защиты. Одним из способов повышения надёжности до должного уровня может быть дублирование. Хороший вариант дублирования – реализовать его в рамках одного терминала МП РЗА. Двумя независимыми друг от друга экземплярами при этом должен быть представлен не только функционал РЗА, но также токовые цепи и цепи питания;
- компактность – часто одна панель МП РЗА способна заменить несколько панелей ЭМ РЗА, в случае же установки в ячейки терминалы МП РЗА также значительно экономят место. Особенно компактными терминалы МП РЗА могут стать, если широкое применение найдёт стандарт МЭК 61850 (или его новые аналоги), т.к. станут ненужными массивные платы аналоговых входов и многочисленные платы дискретных входов/выходов. При этом в панелях РЗА также кардинально уменьшатся размеры клеммных рядов и кабельных связей» [2].
- наблюдаемость, самодиагностика и интегрируемость в АСУ ТП – всё это способно значительно повысить надёжность системы РЗА

(потенциально): тщательный контроль за состоянием устройств РЗА позволяет своевременно выявить его неисправность. «С помощью всестороннего анализа аварийного режима и действий защит можно обнаружить уязвимости в функциональной части РЗА.

- устойчивость к механическим воздействиям – это преимущество МП РЗА по сравнению с ЭМ РЗА, оно также присуще всем статическим реле. Этим преимуществом пользуются там, где релейная защита испытывает большие механические возмущения, например, на подводных лодках;
- малая нагрузка на трансформаторы тока – в отличие от ЭМРЗА, при расчёте нагрузки на трансформаторы тока сопротивление токового входа терминала МП РЗА можно не учитывать – обычно оно не превышает 0,1 Ом. Остаётся сопротивление проводов, которое, как правило, намного больше этого значения. Но применение стандарта МЭК 61850-9-2 практически обнуляет и его, особенно если используются оптические трансформаторы тока;
- высокая чувствительность – как у МЭ РЗА, так и у МП РЗА коэффициенты чувствительности измерительных органов значительно ближе к единице, чем у ЭМ РЗА. Здесь можно было бы привести как преимущество МП РЗА использование измерительных органов по аварийным составляющим. Однако аварийные составляющие давным-давно активно используются ЭМ РЗА, в так называемых фильтровых защитах, пусть, может, и не так эффективно, как в МП РЗА.

Недостатки МП РЗА:

- высокая цена – первые промышленные образцы МП РЗА пришли в Россию из западных стран, они были очень дорогими. В настоящее же время цена МП РЗА постепенно снижается, при этом на рынке появляются всё более бюджетные решения» [2]. Кроме того, благодаря

развитию информационных технологий в электроэнергетике прослеживается тенденция к значительному снижению затрат на техобслуживание МП РЗА. «Переход к техобслуживанию по состоянию;

- необходимость надёжных источников оперативного тока – это недостаток МП РЗА только по сравнению с ЭМ РЗА. Предыдущее поколение, МЭ РЗА, точно так же нуждается в оперативном токе, как и МП РЗА. Следует отметить, что в последнее время необходимость оперативного питания МП РЗА перестала быть строгой. Находят применения разработки, в которых источник питания интегрируется внутрь микропроцессорного терминала, а питание как самого терминала, так и цепей отключения осуществляется от вторичных цепей тока или напряжения;
- необходимость электромагнитной совместимости – это тоже недостаток МП РЗА, который можно привести только в сравнении с ЭМ РЗА. МЭ РЗА также подвержена влиянию внешних электромагнитных полей, причём в большей степени, чем МП РЗА. Чтобы убедиться в верности последнего утверждения, достаточно вспомнить, что цифровая техника более помехозащищённая, чем аналоговая;
- проблема киберугроз связывается исключительно с МП РЗА. Ни для одного из предыдущих поколений релейной защиты она не существовала. Однако, углубляясь в тему, видно, что информационная безопасность нужна только для дополнительных функций, которые закладываются в микропроцессорные терминалы помимо собственно функции РЗА. Если у МП РЗА убрать все связи с внешним цифровым миром, то эта проблема перестанет для неё существовать точно так же, как и для любого другого РЗА предыдущих поколений» [2]. Без ущерба для дополнительного функционала это можно было бы сделать путём размещения защит в микропроцессорном терминале на

отдельной плате, информационно изолированной от внешнего мира и от остальных плат.

Для большей наглядности, в таблице 6 кратко сопоставлены плюсы и минусы МП РЗА по сравнению с электромеханической РЗА.

Таблица 7 – Плюсы и минусы МП РЗА

«+»	«-»
наблюдаемость	необходимость электромагнитной совместимости
самодиагностика	проблема информационной безопасности
многофункциональность	высокая цена
компактность	необходимость надежных источников оперативного тока
устойчивость к механическим воздействиям	узкий рабочий температурный диапазон
интегрируемость в АСУ ТП	
малая нагрузка на трансформаторы тока	
высокая чувствительность	
высокая точность и стабильность измерений	
более простой выбор уставок	
малое энергопотребление	

Переход на микропроцессорную релейную защиту и автоматику представляет собой необходимость в условиях увеличенного производства и возрастающей нагрузки на оборудование. Современные системы защиты ушли далеко вперед по сравнению с устаревшими релейными схемами. Они не только обеспечивают базовую защиту оборудования, но и постоянно отслеживают его состояние в реальном времени. Благодаря этому можно оперативно выявлять и устранять возможные сбои, снижая вероятность аварий [5].

Кроме того, микропроцессорные системы легко интегрируются с промышленными системами управления, что дает возможность анализировать

данные и заранее планировать техобслуживание. Это сокращает внеплановые остановки производства и связанные с ними убытки. Сбор и обработка статистики с оборудования помогают находить слабые места и прогнозировать развитие производственных линий.

Вывод. Переход на современные системы защиты делает работу оборудования стабильнее, а производство — эффективнее. Такие технологии открывают новые возможности для автоматизации, повышая конкурентоспособность предприятия. В условиях растущих требований они обеспечивают надежность и безопасность ключевых процессов [14].

2.3 Трудности, возникающие в ходе проведения модернизации релейной защиты

Модернизация релейной защиты (РЗА) с заменой электромеханических (ЭМ) реле на микропроцессорные (МП) устройства — сложный процесс, имеющий ряд технических и организационных проблем [4]:

- Совместимость оборудования. Старые ЭМ-реле работали в аналоговых цепях, а МП-устройства требуют цифровых сигналов. Это приводит к необходимости модернизации вторичных цепей, датчиков тока и напряжения, а также коммуникационной инфраструктуры [3].
- Настройка и адаптация. Микропроцессорные устройства обладают гибкими настройками, но их конфигурация требует глубоких знаний. Ошибки в параметризации могут привести к ложным срабатываниям или, наоборот, к отказу защиты [19].
- Обучение персонала. Эксплуатация МП-РЗА требует новых компетенций. Персонал, привыкший к электромеханике, не всегда готов к работе с цифровыми интерфейсами и программным обеспечением без дополнительного обучения.

- Финансовые затраты. Помимо стоимости самих устройств, требуются расходы на проектирование, монтаж, пусконаладку и обучение. Часто возникают непредвиденные затраты из-за необходимости доработки существующей инфраструктуры.
- Надежность и кибербезопасность. Микропроцессорные системы уязвимы к сбоям питания, электромагнитным помехам и кибератакам. Требуется дополнительная защита: ИБП, экранирование, регулярное обновление ПО [17].

Вывод. Переход на МП-РЗА повышает точность и функциональность защиты, но требует тщательной реализации. Без учета вышеперечисленных факторов модернизация может привести к снижению надежности системы, возникновению ложных срабатываний или, наоборот, пропуску повреждений. Кроме того, важно учитывать кибербезопасность МП-РЗА, так как цифровые устройства становятся потенциальными целями для атак. Данное мероприятие требует комплексного подхода, включающего не только техническую модернизацию, но и организационные меры.

3 Релейная защита распределительных сетей 10 кВ

Основные задачи и подходы стандартизации в РФ регламентируются ФЗ №184 от 27.12.2002 "О техническом регулировании", тогда как требования к использованию корпоративных стандартов определяются ГОСТ Р 1.4-2004 "Стандартизация в РФ. Организационные стандарты. Основные требования".

Далее будет представлен расчетный алгоритм и практический пример определения параметров срабатывания защитных устройств БМРЗ для распределительных сетей 10 кВ.

3.1 Токовые защиты распределительных сетей

В распределительных сетях 10 кВ основным средством защиты от коротких замыканий служат токовые защиты, которые условно делятся на два типа: мгновенная токовая отсечка (ТО) и максимальная токовая защита (МТЗ). Эти защиты отличаются принципом обеспечения селективности - МТЗ использует временные задержки, тогда как ТО работает за счет правильного подбора уставок по току.

Особенности токовой отсечки:

- уставка срабатывания ТО выбирается выше максимально возможного тока КЗ на границе защищаемого участка.
- Мгновенная ТО (без выдержки времени) действует строго в пределах защищаемого элемента.
- ТО с временной задержкой может охватывать смежные участки, но требует согласования по току и времени с соседними защитами.

Принципы работы МТЗ:

- Порог срабатывания устанавливается выше максимального рабочего тока оборудования.

- Требуется комплексное согласование с защитами смежных участков. Уставка по току: должна превышать значения защит предыдущих участков с учетом нагрузки, а выдержка по времени: должна быть больше, чем у защит предыдущих присоединений.

«Особое внимание уделяется согласованию характеристик между блоками БМРЗ, плавкими вставками предохранителей на 6(10) кВ и 0,4 кВ, с автоматическими выключателями 0,4 кВ.

В последующих разделах будет проведен детальный анализ времятоковых характеристик указанных защитных устройств для обеспечения их правильного взаимодействия в системе защиты» [13].

3.2 Времятоковые характеристики блоков БМРЗ

«Наибольшее распространение получила МТЗ с независимой времятоковой характеристикой (рисунок 12)» [13].

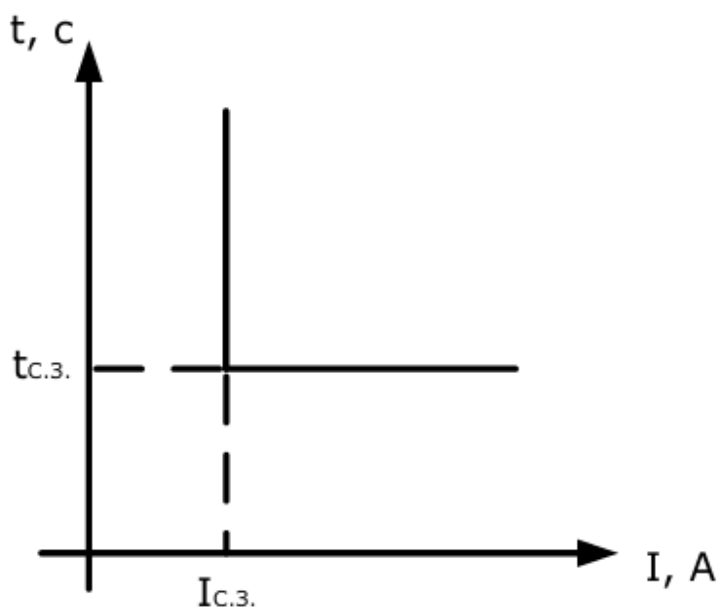


Рисунок 12 – Независимая времятоковая характеристика

«В дополнение к МТЗ с независимой выдержкой времени существуют защиты с зависимой от тока времятоковой характеристикой. На рисунке 13 представлен набор таких характеристик.

Особенности расчета и настройки:

- Основным параметром при расчете является ток срабатывания защиты ($I_{с.з.}$).
- Временная выдержка регулируется путем выбора конкретной кривой из представленного семейства характеристик при сохранении неизменного значения тока срабатывания.

Таким образом, варьируя времятоковую характеристику при фиксированном $I_{с.з.}$, можно гибко настраивать защиту под конкретные условия эксплуатации» [13].

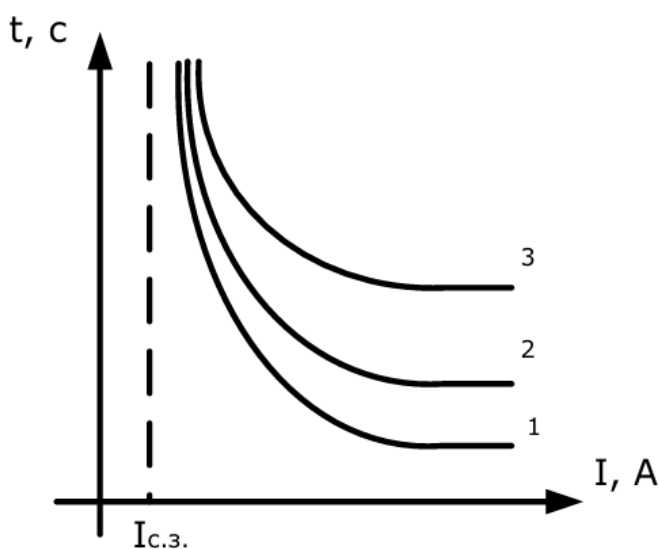


Рисунок 13 –Зависимые времятоковые характеристики

«В случае применения зависимых времятоковых характеристик обеспечивается меньшее время срабатывания защиты, расположенной ближе к источнику, т.е. в точке с наибольшим уровнем тока КЗ» [13].

На рисунке 14 приведен участок сети и времятоковые характеристики МТЗ. Из рисунка видно, что при применении МТЗ с зависимыми

времятоковыми характеристиками отключение КЗ в точке К1 с наибольшим током КЗ происходит с меньшей выдержкой времени.

«При согласовании по времени МТЗ с независимыми характеристиками самое близкое к источнику КЗ отключается с наибольшей выдержкой времени.

На рисунке 14 представлено сравнение согласования МТЗ с времятоковыми характеристиками» [13].

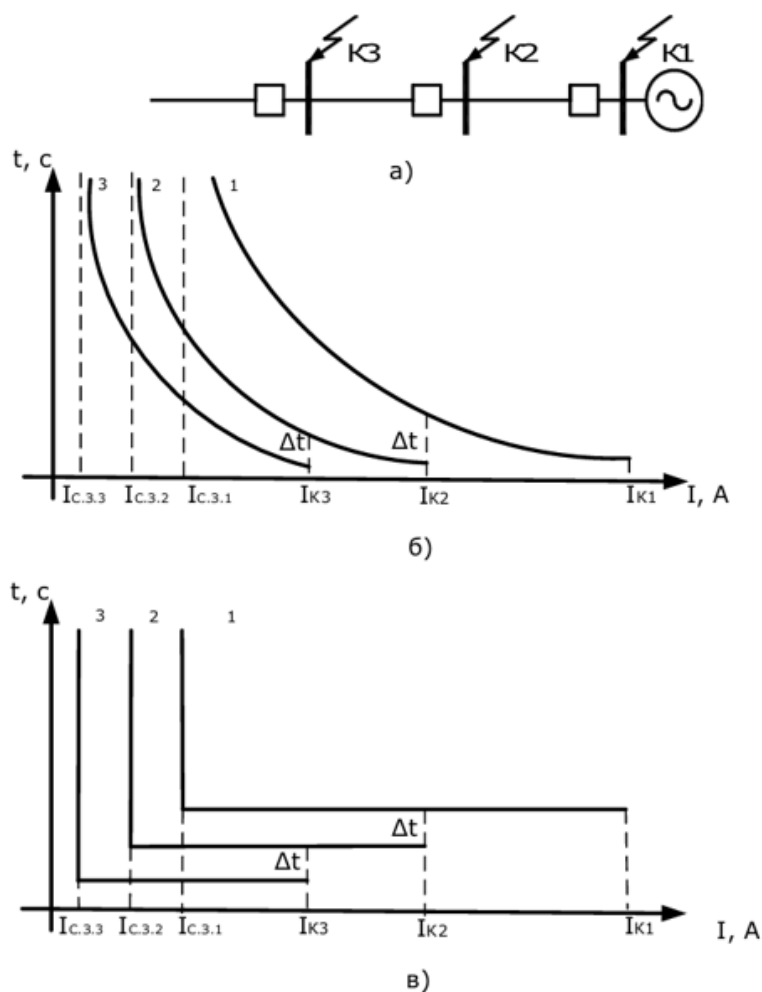


Рисунок 14 –Сравнение согласования МТЗ с зависимой и независимой времятоковой характеристикой на примере участка сети. а) первичная схема участка сети; б) согласование МТЗ с зависимыми характеристиками; в) согласование МТЗ с независимыми характеристиками

«В блоках БМРЗ возможен выбор одной из четырёх зависимых времятоковых характеристик. Типы и аналитические зависимости времятоковых характеристик соответствуют ИЕС и приведены в таблице 7.

В общем виде зависимые характеристики описываются следующим уравнением:

$$t = \frac{k \cdot K}{\left(\frac{I}{I_{\text{с.з.}}}\right)^{\alpha} - 1} \quad (1)$$

где k , α – постоянные величины, зависящие от типа характеристики;

K – уставка коэффициента усиления;

I – входной вторичный ток, измеряемый блоком, А;

$I_{\text{с.з.}}$ – ток срабатывания защиты, А» [13].

Таблица 8 - Типы времятоковых характеристик блоков БМРЗ

Наименование характеристики	Значения постоянных	Аналитическая зависимость
инверсная	$k = 0,14$ $\alpha = 0,02$	$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I}{I_{\text{с.з.}}}\right)^{0,02} - 1} * K$
сильно инверсная	$k = 13,5$ $\alpha = 1$	$t = \frac{13,5}{\frac{I}{I_{\text{с.з.}}} - 1} * K$
длительно инверсная	$k = 120$ $\alpha = 1$	$t = \frac{120}{\frac{I}{I_{\text{с.з.}}} - 1} * K$
чрезвычайно инверсная	$k = 80$ $\alpha = 2$	$t = \frac{80}{\left(\frac{I}{I_{\text{с.з.}}}\right)^2 - 1} * K$

«Обозначения: K – коэффициент усиления (уставка K); I – входной вторичный ток, измеряемый блоком, А; $I_{\text{с.з.}}$ – ток срабатывания защиты.

На рисунке 15 приведены зависимые характеристики при коэффициенте усиления, равном 1» [13].

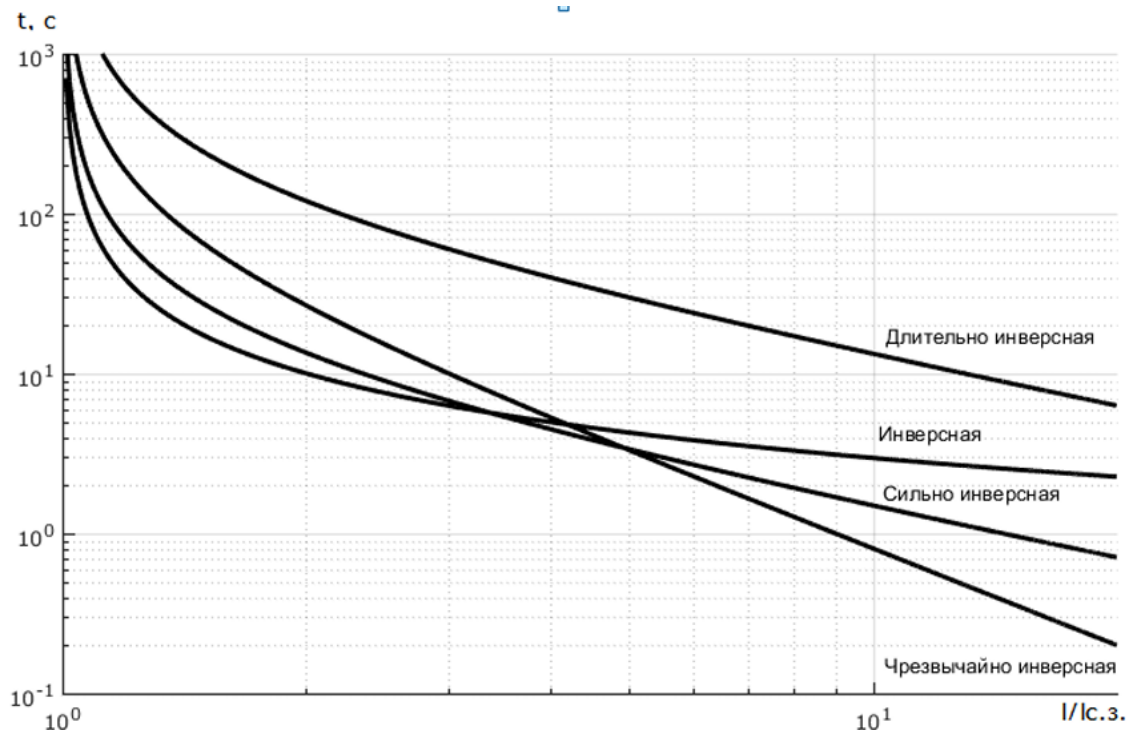


Рисунок 15– Времятоковые характеристики блоков БМРЗ

«Прямая, параллельная оси времени и проходящая через значение тока $I_{с.з.}$, является вертикальной асимптотой для всех зависимых времятоковых характеристик. Пуск ступени производится при токах, превышающих $I_{с.з.}$. Максимальное расчетное время срабатывания зависимых времятоковых характеристик составляет 180 минут.

Пределы допускаемой погрешности по времени срабатывания для ступеней с зависимыми времятоковыми характеристиками для $1,2 \leq I/I_{с.з.} \leq 20$: при $t \leq 1$ с составляют не более ± 30 мс, при $t > 1$ с составляют не более 5 %» [13].

«Рекомендуемый используемый диапазон зависимых времятоковых характеристик $I_{с.з.}$ от 2 до 20.

Регулировка выдержки времени срабатывания осуществляется выбором коэффициента усиления K . На рисунке 16 приведено семейство зависимых времятоковых характеристик при различных значениях коэффициента K . Аналогичные семейства характеристик можно построить для других времятоковых характеристик» [13].

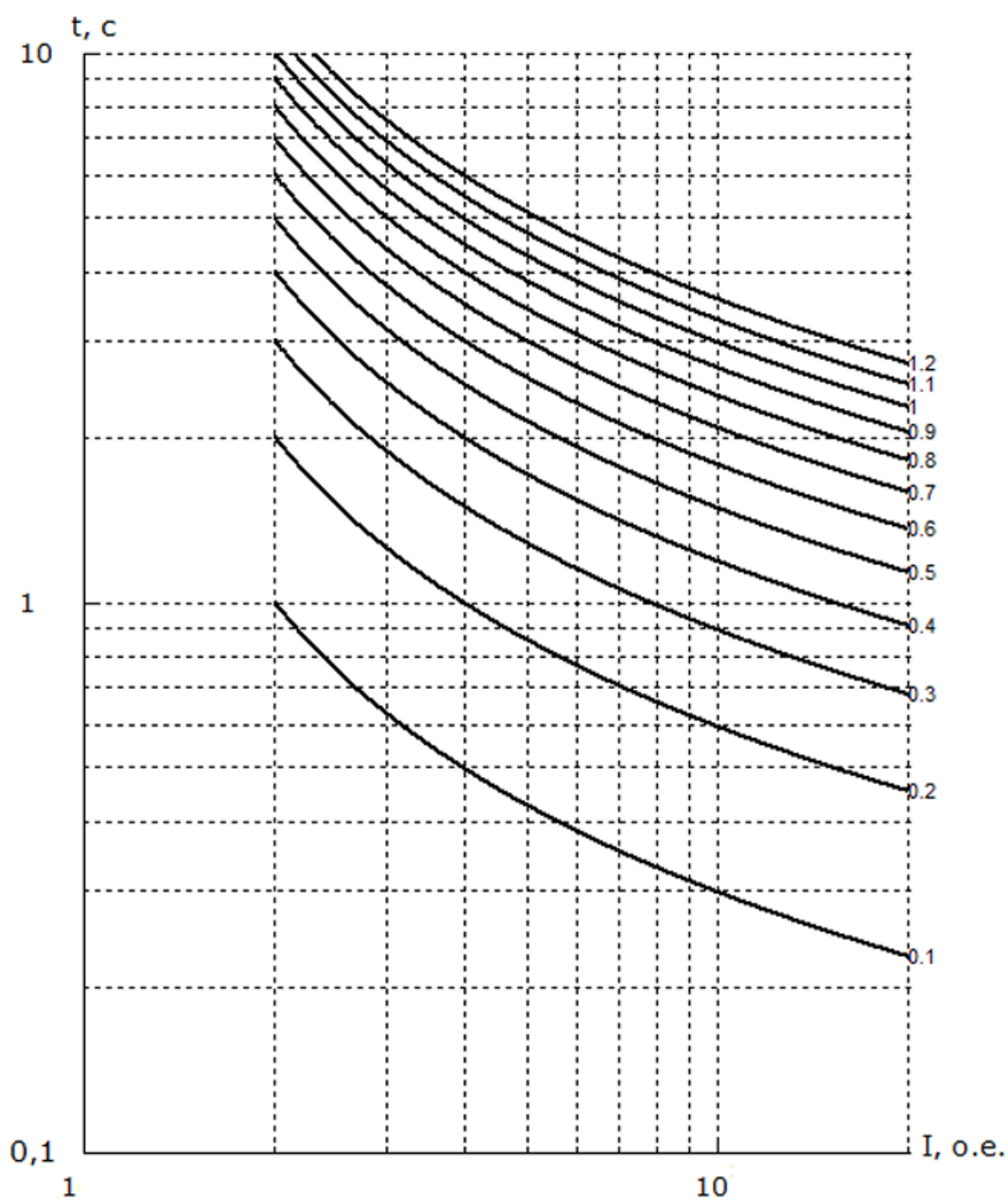


Рисунок 16 – Семейство инверсных характеристик

«В большинстве случаев рекомендуется применение инверсной характеристики, так как данная характеристика наилучшим образом обеспечивает увеличение выдержки времени при удалении от источника. При близких КЗ должно обеспечиваться отключение КЗ с наименьшей выдержкой времени, при КЗ в начале зоны действия предыдущей защиты - при выдержке, определяемой условием согласования.

Сильно инверсная характеристика применяется при значительном снижении тока КЗ по мере удаления точки от источника питания, т.е. при значительном сопротивлении элемента сети по отношению к сопротивлению источника питания. Время срабатывания реле с сильно инверсной характеристикой обратно пропорционально поданному к реле току.

Время срабатывания реле с чрезвычайно инверсной характеристикой обратно пропорционально квадрату поданного к реле тока. Это позволяет применять данную характеристику на трансформаторах, при включении которых происходит бросок тока намагничивания. Также МТЗ с чрезвычайно инверсной характеристикой хорошо согласуется с предохранителями» [13].

3.3 Согласование по току

«В тех случаях, когда возможно действие защиты последующего элемента Э1 (рисунок 17) из-за отказа защиты предыдущего элемента Э2 вследствие недостаточной чувствительности, чувствительность этих защит необходимо согласовать между собой. Согласование заключается в выборе таких токов срабатывания, при которых МТЗ элемента Э1 имела бы больший ток срабатывания, т.е. была менее чувствительна» [13].

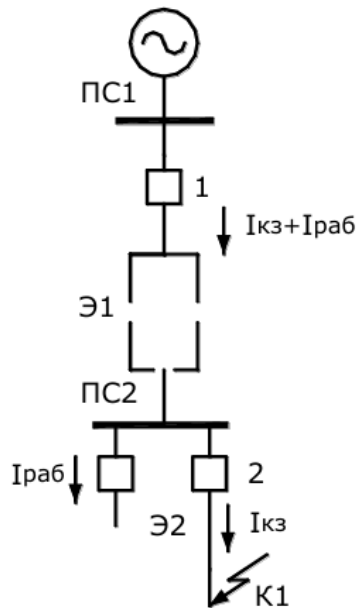


Рисунок 17 – Токораспределение при удаленном КЗ в сети с односторонним питанием

«При согласовании чувствительности защит необходимо учитывать возможность существенного влияния токов нагрузки. Так при удаленных КЗ на элементе Э2 напряжение на шинах может сохраняться близким к нормальному, при этом через элемент Э1 будет проходить сумма тока КЗ поврежденного элемента и токов нагрузки неповрежденных элементов.

По условию согласования с защитами предыдущих элементов ток срабатывания защиты 1 $I_{с.з.}$, А, выбирают по формуле:

$$I_{с.з.} = \frac{k_{отс}}{k_{ток}} * (I_{с.з.макс} + \Sigma I_{раб.}) \quad (2)$$

где $k_{отс}=1,2$ – коэффициент отстройки;

$k_{ток}$ – коэффициент токораспределения, который учитывается только при наличии нескольких источников питания, при одном источнике питания принимается равным 1;

$I_{с.з.макс}$ – наибольший из токов срабатывания защит одного из предыдущих присоединений, А» [13];

$\Sigma I_{\text{раб.}}$ – суммарный ток нагрузки неповрежденных элементов, А.

«Если в качестве предыдущего защитного аппарата установлен предохранитель, то ток срабатывания $I_{\text{с.з.}}$, А, выбирают по формуле:

$$I_{\text{с.з.}} = k_{\text{отс}} * (k'_{\text{отс}} * I_{\text{вс.ном.макс}} + \Sigma I_{\text{раб.}}) \quad (3)$$

где $k_{\text{отс}}=1,3$ – коэффициент отстройки;

$k'_{\text{отс}} = 2$ – коэффициент отстройки от номинального тока плавкой вставки предохранителя;

$I_{\text{вс.ном.макс}}$ – наибольший из номинальных токов плавких вставок предохранителей, А;

$\Sigma I_{\text{раб.}}$ – суммарный ток нагрузки неповрежденных элементов, А.

Зависимая характеристика выдержки времени позволяет выбирать меньший ток срабатывания по условию согласования с плавкими вставками предохранителей трансформаторов ответвлений.

Если в качестве предыдущего защитного аппарата установлен автоматический выключатель, то ток срабатывания $I_{\text{с.з.}}$, А, выбирают по формуле:

$$I_{\text{МТЗ с.з.}} = k_{\text{отс}} * (I_{\text{с.о.}} + \Sigma I_{\text{раб.}}) \quad (4)$$

где $k_{\text{отс}}=1,3$ – коэффициент отстройки;

$I_{\text{с.о.}}$ – ток срабатывания отсечки автоматического выключателя, А;

$\Sigma I_{\text{раб.}}$ – суммарный ток нагрузки, неповрежденных элементов, А»
[13].

3.4 Согласование по времени

Время срабатывания защиты выбирается из условия обеспечения селективности с защитами предыдущих и последующих элементов.

«Разность между временем действия защит двух смежных элементов (защиты 1 и 2 на рисунке 18).

Выдержка времени защиты 1 должна быть на ступень селективности больше времени срабатывания защиты 2 для исключения неселективного срабатывания защиты 1 до отключения выключателя Q2 защитой 2» [13].

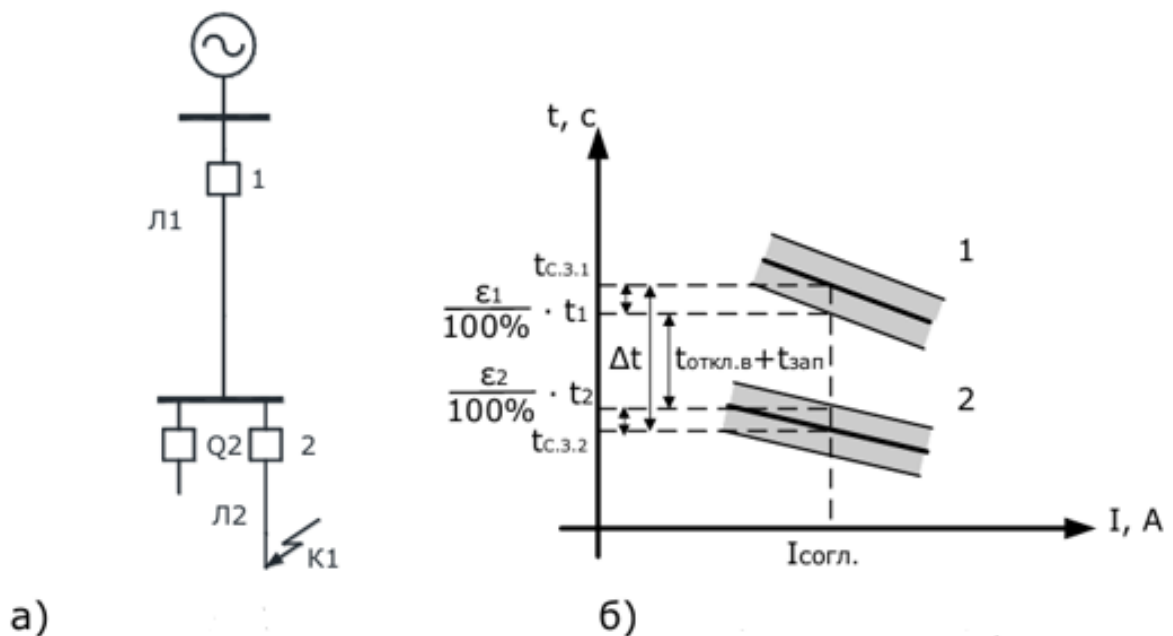


Рисунок 18 – Определение ступени селективности. а) первичная схема сети; б) времятоковые характеристики) называется ступенью селективности

«Ступень селективности Δt , с, вычисляют по формуле:

$$\Delta t = \frac{\varepsilon_1}{100} \cdot t_{с.з.1} + \frac{\varepsilon_2}{100} \cdot t_{с.з.2} + t_{откл.в} + t_{в1} + t_{зап} \quad (5)$$

где ε_1 - погрешность срабатывания по времени защиты 1, %;

$t_{с.з.1}$ – выдержка времени защиты 1 при токе согласования, с;

ε_2 – погрешность срабатывания по времени защиты 2 при токе согласования, %;

$t_{с.з.2}$ – выдержка времени защиты 2 при токе согласования, с» [13];

$t_{\text{откл.в}}$ – полное время отключения выключателя Q2 (интервал времени от момента подачи команды на отключение до момента погасания дуги во всех полюсах выключателя), с;

$t_{\text{в1}}$ – время возврата защиты 1, для блоков БМРЗ принимается равным 0,03 с;

$t_{\text{зап}}$ – необходимое время запаса, учитывающее в том числе время срабатывания промежуточных реле, с.

«Для защит с независимыми характеристиками время срабатывания $t_{\text{с.з.1}}$, с, выбирают по формуле:

$$t_{\text{с.з.1}} = t_{\text{с.з.2}} + \Delta t \quad (6)$$

где $t_{\text{с.з.2}}$ – время срабатывания предыдущей защиты, с;

Δt – ступень селективности, с.

Пример согласования защит с независимыми характеристиками представлен на рисунке 19» [13].

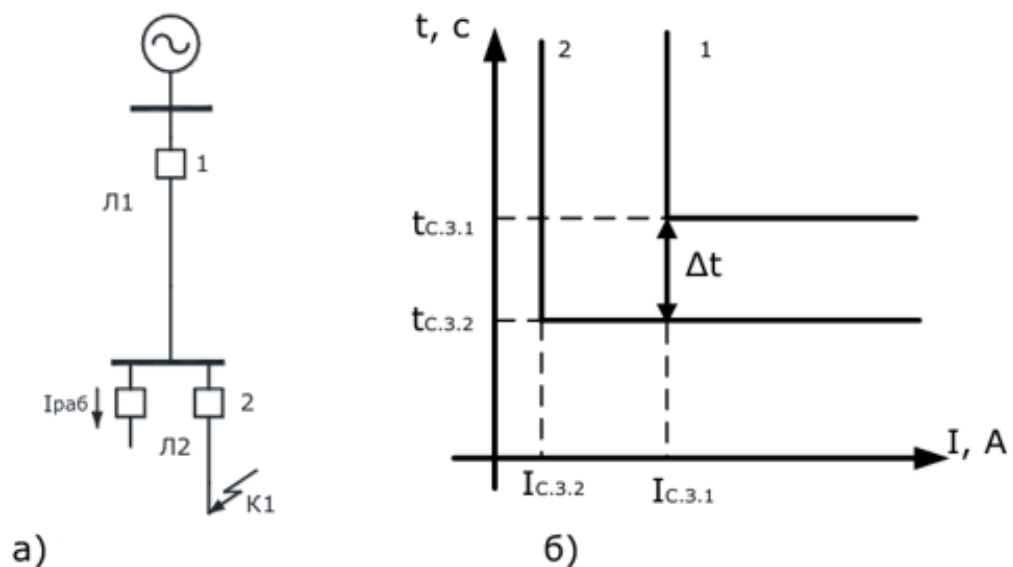


Рисунок 19 – Согласование характеристик защит. а) первичная схема сети; б) времятоковые характеристики

«Выдержку времени защиты с независимой характеристикой по условию согласования с защитой с зависимой характеристикой выбирают следующим образом (рисунок 20):

- определяют время срабатывания защиты 2 $t_{с.з.2}$, с, при токе срабатывания защиты 1 $I_{с.з.1}$;
- рассчитывают ступень селективности Δt по формуле (5);
- определяют время срабатывания защиты 1 $t_{с.з.1}$, с, по формуле:

$$t_{с.з.1} = t_{с.з.2} + \Delta t \quad (7)$$

где $t_{с.з.2}$ – время срабатывания защиты 2, с;

Δt – ступень селективности, с» [13].

Далее изображен рисунок 20.

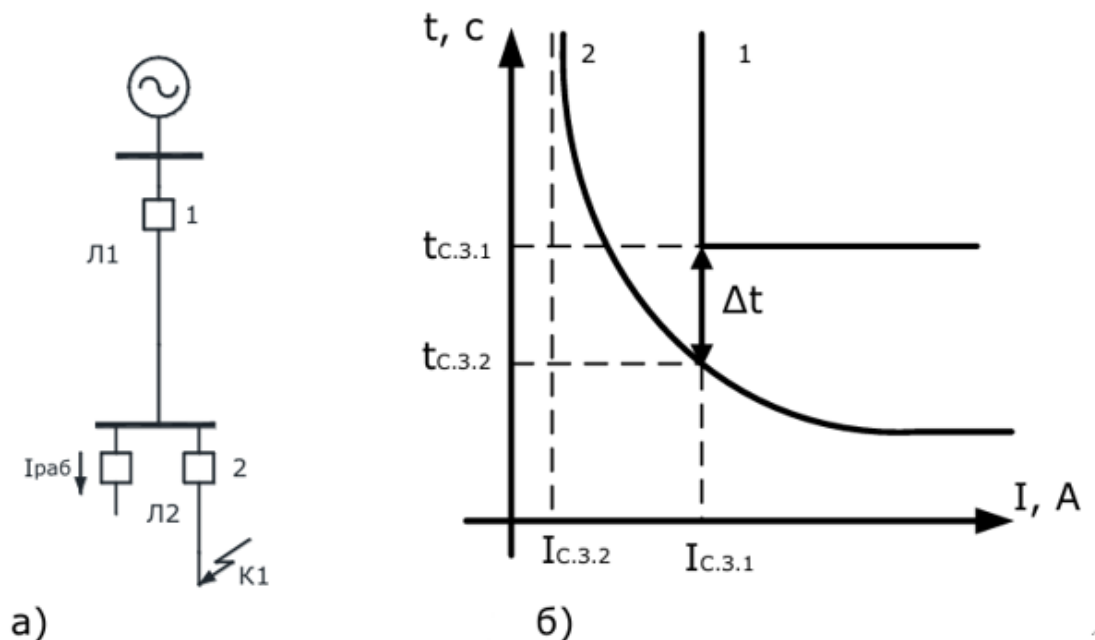


Рисунок 20 – Согласование характеристик защит. а) первичная схема сети; б) времятоковые характеристики

«При согласовании защит с зависимыми характеристиками уставку коэффициента усиления защиты с зависимой характеристикой выбирают следующим образом:

- определяют ток согласования $I_{\text{согл}}$. При использовании отсечки ток согласования принимают равным току срабатывания отсечки (рисунок 21). Если отсечка не используется, то ток согласования принимают равным максимальному значению тока трехфазного КЗ в начале присоединения 2;
- рассчитывают время срабатывания защиты 2 $t_{\text{с.з.2}}$ при токе согласования $I_{\text{согл}}$;
- рассчитывают ступень селективности Δt по формуле (5);
- определяют требуемое время срабатывания защиты 1 $t_{\text{с.з.1}}$, с, по формуле:

$$t_{\text{с.з.1}} = t_{\text{с.з.2}} + \Delta t \quad (8)$$

где $t_{\text{с.з.2}}$ – время срабатывания защиты 2, с;

Δt – ступень селективности, с;

- задаются типом характеристики;
- рассчитывают уставку коэффициента усиления защиты 1 по формуле:

$$K = \frac{t_{\text{с.з.1}}}{k} \cdot \left(\left(\frac{I_{\text{согл}}}{I_{\text{с.з.1}}} \right)^\alpha - 1 \right) \quad (9)$$

где $t_{\text{с.з.1}}$ – время срабатывания защиты 1, с;

k, α – постоянные величины, зависящие от типа характеристики;

$I_{\text{согл}}$ – ток согласования, А;

$I_{\text{с.з.1}}$ – ток срабатывания защиты 1, А» [13].

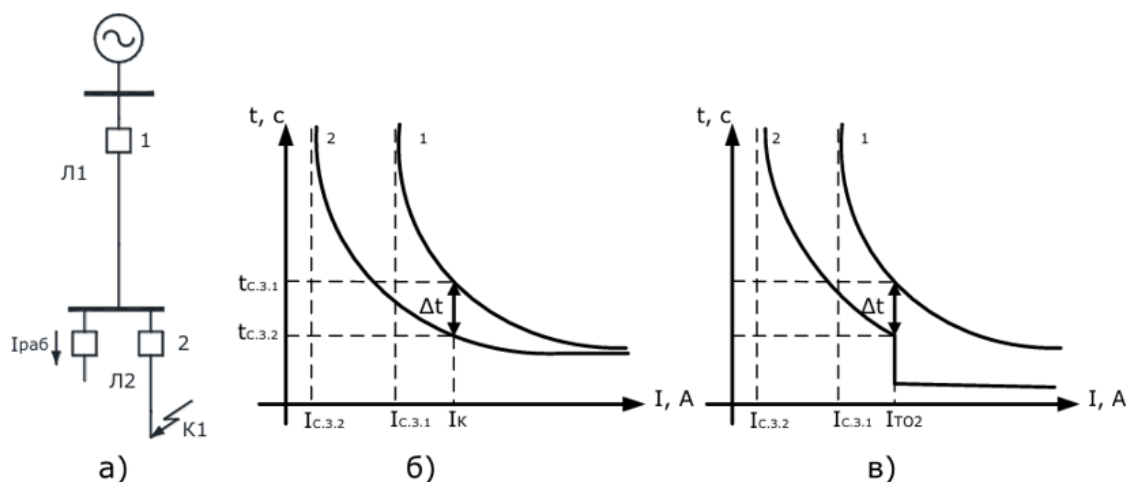


Рисунок 21 – Согласование времятоковых характеристик защит.

а) первичная схема сети; б) времятоковые характеристики, если отсечка не используется; в) времятоковые характеристики, если используется отсечка

«Рекомендуется проводить проверку выполнения условия селективности согласуемых защит при токах, меньших тока согласования $I_{\text{согл}}$:

$$I_{\text{с.з.1}} > I_{\text{с.з.2}} + \Delta t \quad (10)$$

где $I_{\text{с.з.2}}$ – время срабатывания защиты 2, с;

Δt – степень селективности, с

Необходимо отметить, что степень селективности защит с зависимыми выдержками времени зависит от расчетной выдержки времени согласуемых защит. При токах, меньших тока согласования $I_{\text{согл}}$, увеличиваются выдержки времени защит, соответственно увеличивается погрешность и необходимо увеличивать степень селективности.

Для наглядности рекомендуется выполнять совместное построение времятоковых характеристик согласуемых защит. Совместное построение времятоковых характеристик согласуемых защит называется картой селективности.

Согласование защиты с плавкими вставками предохранителей выполняют так же, как выполняют согласование с защитой с зависимой характеристикой выдержки времени» [13]. При этом необходимо учитывать, что плавкие вставки предохранителей имеют наибольшую погрешность по сравнению с устройствами релейной защиты.

«При согласовании защиты с автоматическими выключателями ток срабатывания защиты отстраивают от тока срабатывания отсечки $I_{с.о.}$. Согласование по времени выполняют по аналогии с вышеприведенными примерами (см. рисунок 22)» [13].

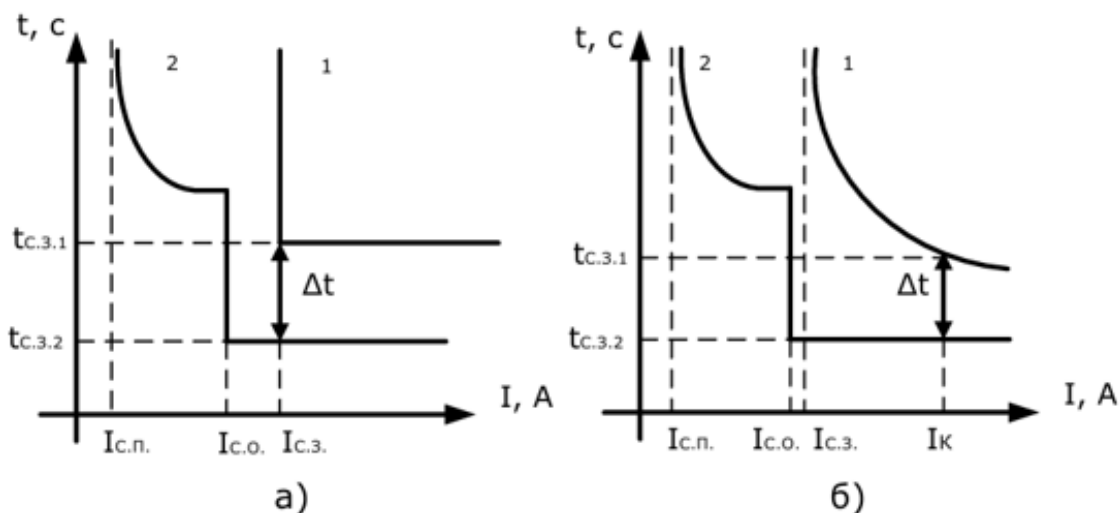


Рисунок 22 – Согласование характеристик защит с характеристиками автоматических выключателей. а) согласование защиты с независимой характеристикой с характеристикой автоматического выключателя; б) согласование защиты с зависимой характеристикой с характеристикой автоматического выключателя

Для учета влияния токов нагрузки неповрежденных элементов характеристика срабатывания предыдущего элемента (рисунок 23) должна быть сдвинута вправо на отрезок, равный значению суммарного тока нагрузки $I_{раб.}$

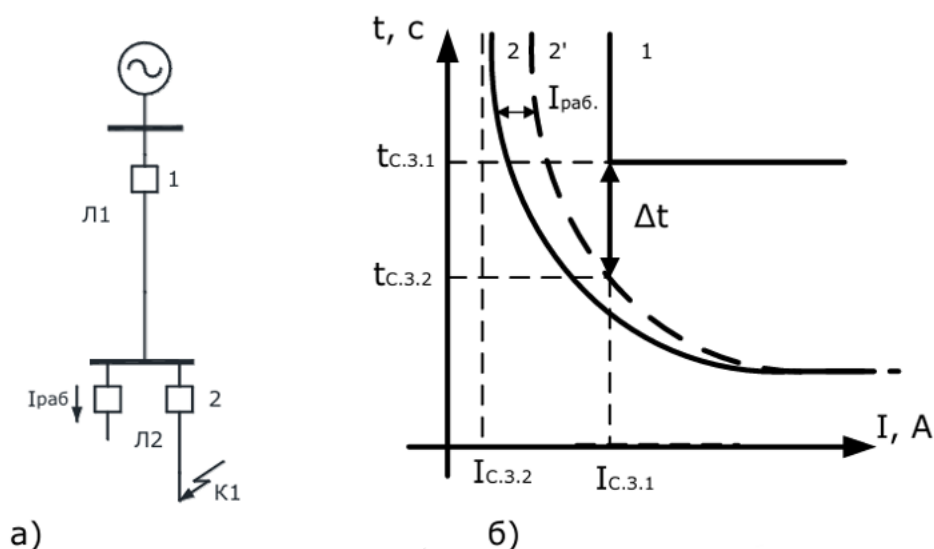


Рисунок 23 – Согласование характеристик с учетом тока нагрузки.

а) первичная схема сети; б) времятоковые характеристики

3.5 Обоснование выбора МП защиты

Для защиты отходящей линии 10 кВ на распределительном пункте «РП-13» был выбран шкаф типа ШЭ-МТ-015 и блок БМРЗ-50-2-3-02 производства НТЦ «Механатроника». В этой главе описаны их ключевые преимущества перед аналогами [6].

Шкаф защиты отходящих линий ШЭ-МТ-015 представляет собой современное и надежное решение для защиты электрооборудования, обладающее рядом существенных преимуществ перед аналогами других производителей. Одним из ключевых достоинств является компактность и удобство монтажа. Оптимальные габариты и продуманная модульная конструкция позволяют легко интегрировать шкаф в существующие электроустановки, а удобное расположение клемм и элементов управления значительно упрощает процесс обслуживания [15].

Важным преимуществом ШЭ-МТ-015 является его надежная система защиты линий. Шкаф демонстрирует совместим с различными типами нагрузок, эффективно защищая двигатели, трансформаторы, кабельные линии

и другие электроустановки, при этом доступны различные модификации под разные номиналы тока.

Наличие интерфейсов RS-485 и поддержка протокола Modbus RTU позволяют интегрировать шкаф ШЭ-МТ-015 в системы АСУ ТП, обеспечивая возможности дистанционного мониторинга и управления. Качество сборки и элементной базы находится на высоком уровне.

Шкаф полностью соответствует требованиям безопасности, включая стандарты ПУЭ, ГОСТ Р 50030X [8]. Также соответствуют и стандартам IEC [18]. Степень защиты от внешних воздействий обеспечивает надежную работу в различных условиях. По сравнению с зарубежными аналогами от ABB или Schneider Electric, ШЭ-МТ-015 предлагает более выгодное соотношение цены и качества при сохранении высокого уровня функциональности. При сопоставимой гибкости настроек и наличии интерфейсов связи, российская разработка отличается более доступной ценой, лучшей ремонтопригодностью и адаптацией под местные условия эксплуатации. Все эти особенности делают шкаф ШЭ-МТ-015 оптимальным выбором для промышленных и коммерческих объектов, где требуются надежная защита электрооборудования, простота эксплуатации и интеграции в современные системы управления.

Высокая надежность и долговечность

В отличие от электромеханических реле, где износ контактов и механических элементов со временем приводит к отказу, БМРЗ-50-2-3-02 построен на полупроводниковой элементной базе, что исключает механический износ и увеличивает срок службы [1].

Преимущества БМРЗ-50-2-3-02 перед электромеханическими реле и зарубежными аналогами:

- Быстродействие и точность срабатывания. Электромеханические реле обладают задержкой срабатывания из-за инерционности подвижных частей. В БМРЗ-50-2-3-02 время реакции на изменение параметров сети сокращено в разы, что повышает точность защиты оборудования.

- Устойчивость к вибрациям и внешним воздействиям. Традиционные реле чувствительны к механическим воздействиям, тогда как БМРЗ-50-2-3-02 не содержит подвижных элементов, что делает его устойчивым к вибрациям, ударам и другим неблагоприятным условиям эксплуатации.
- Гибкость настроек и адаптивность. В отличие от зарубежных аналогов с фиксированными параметрами, данный блок позволяет точно настраивать уставки под конкретные условия работы, что расширяет сферу его применения.
- Снижение эксплуатационных затрат. Отсутствие необходимости в частом обслуживании (чистка контактов, регулировка) уменьшает затраты на техническое сопровождение по сравнению с электромеханическими реле.
- Совместимость с современными системами управления. БМРЗ-50-2-3-02 поддерживает цифровые интерфейсы для интеграции в АСУ ТП, тогда как многие устаревшие аналоги требуют дополнительных преобразователей сигналов.
- Энергоэффективность. Полупроводниковая схема потребляет меньше энергии по сравнению с катушками электромеханических реле, что снижает нагрузку на источники питания.
- Компактность и удобство монтажа. Блок имеет оптимальные габариты и продуманную конструкцию, что упрощает его установку в существующие щиты управления без значительных доработок.

Таким образом, БМРЗ-50-2-3-02 превосходит традиционные электромеханические реле и многие зарубежные аналоги по ключевым параметрам, обеспечивая надежную и экономичную защиту электрооборудования.

Далее на рисунке 24 представлена электрическая схема подключения блока БМРЗ-50-2-3-02.

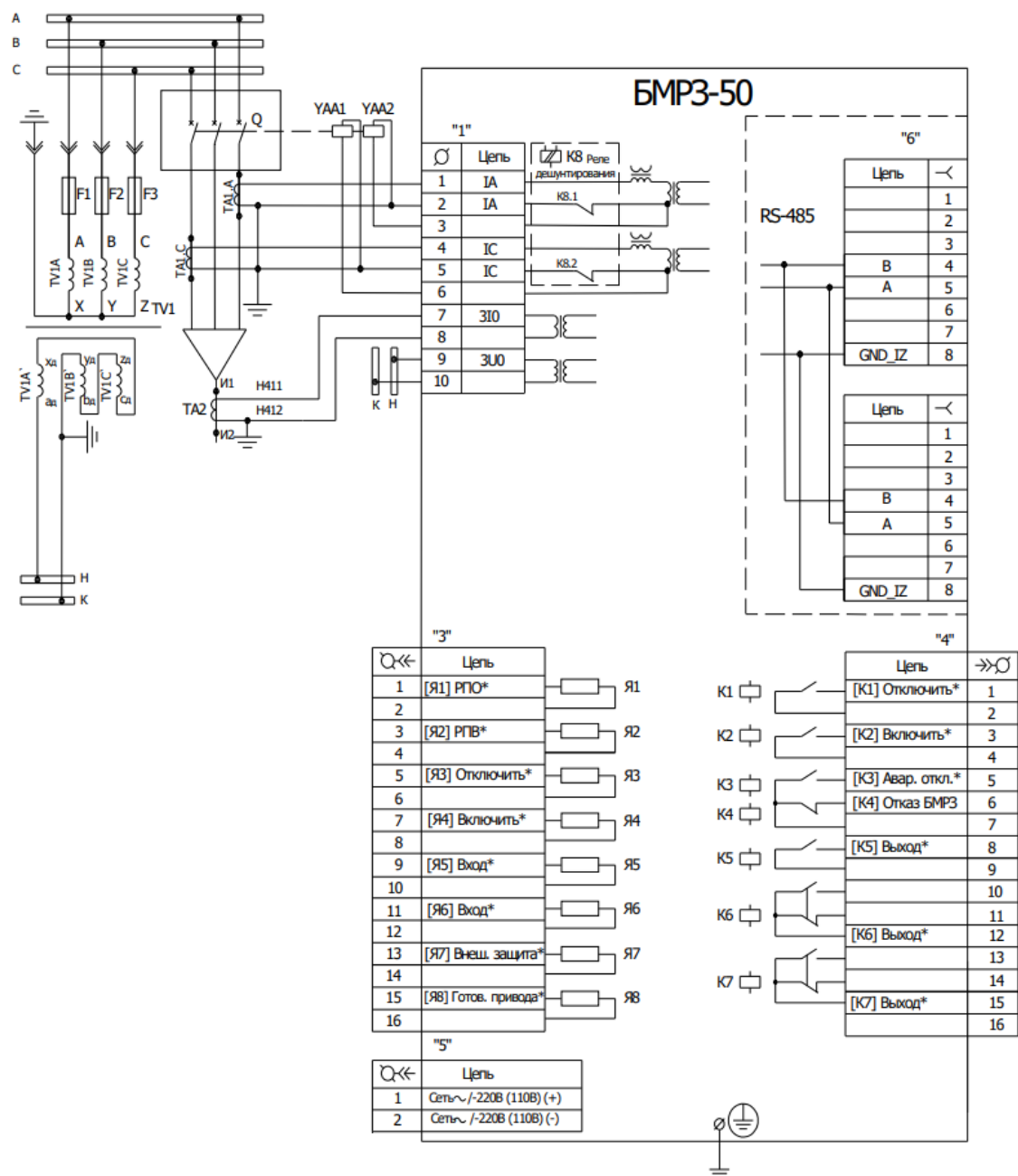


Рисунок 24 – Схема электрическая подключения БМРЗ-50

В блоке стоит реле, которое отключает токовые электромагниты (расцепитель на большой ток) при срабатывании защиты. Оно работает на подстанциях как с переменным оперативным током, так и без него.

Максимальный ток, который оно может размыкать, — до 150 А. Схема подключения электромагнитов отключения показана на рисунке 25.

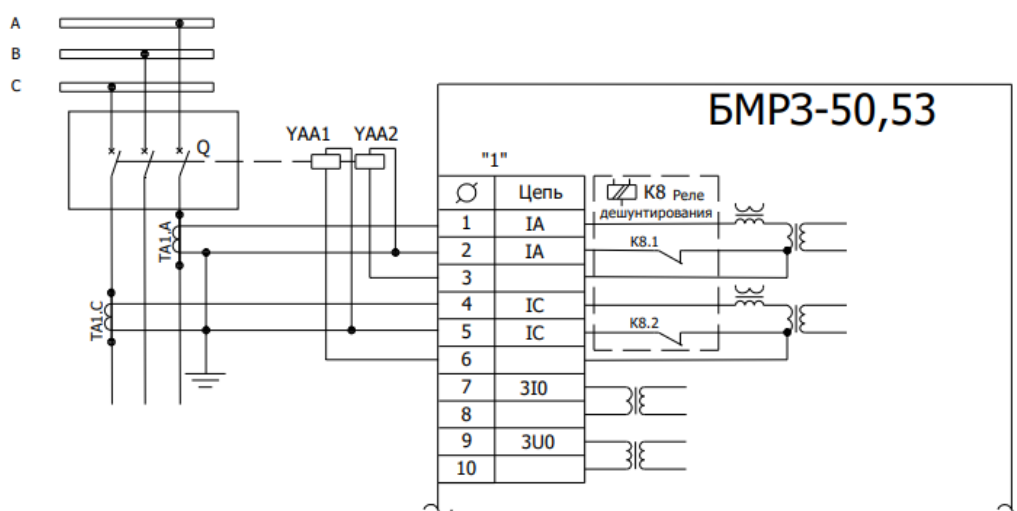


Рисунок 25 – Подключение токовых электромагнитов отключения YAA1, YAA2

Схема с дешунтированием работает так: когда срабатывает токовая защита, вторичный ток от трансформаторов ТА1.А и ТА1.С поступает на электромагниты отключения YAA1 и YAA2, которые разрывают цепь выключателя.

В обычном режиме (если защита не срабатывает) ток идёт через измерительные и питающие трансформаторы блока, а также через замкнутые контакты К8.1 и К8.2 реле дешунтирования. При срабатывании защиты эти контакты размыкаются, и ток переключается на катушки YAA1 и YAA2. Если ток превышает порог срабатывания, выключатель отключается.

Реле дешунтирования возвращается в исходное состояние (контакты К8.1 и К8.2 замыкаются) после восстановления защиты, но не раньше, чем через 1 секунду после срабатывания. Также возврат происходит при отключении блока.

В цепях управления необходимо предусмотреть отключение питания после выполнения команды или использовать промежуточное реле. На рисунках 26 и 27 приведены примеры подключения цепей управления для выключателей с пружинным и электромагнитным приводом.

Блок поддерживает два способа управления выключателем, но работает только в одном режиме в каждый момент времени. Режим выбирается автоматически: если на входе есть сигнал "ОУ", используется управление через каналы связи, а если сигнала нет - команды подаются через дискретные входы "Включить" и "Отключить". Переключение между режимами происходит мгновенно при изменении состояния сигнала "ОУ".

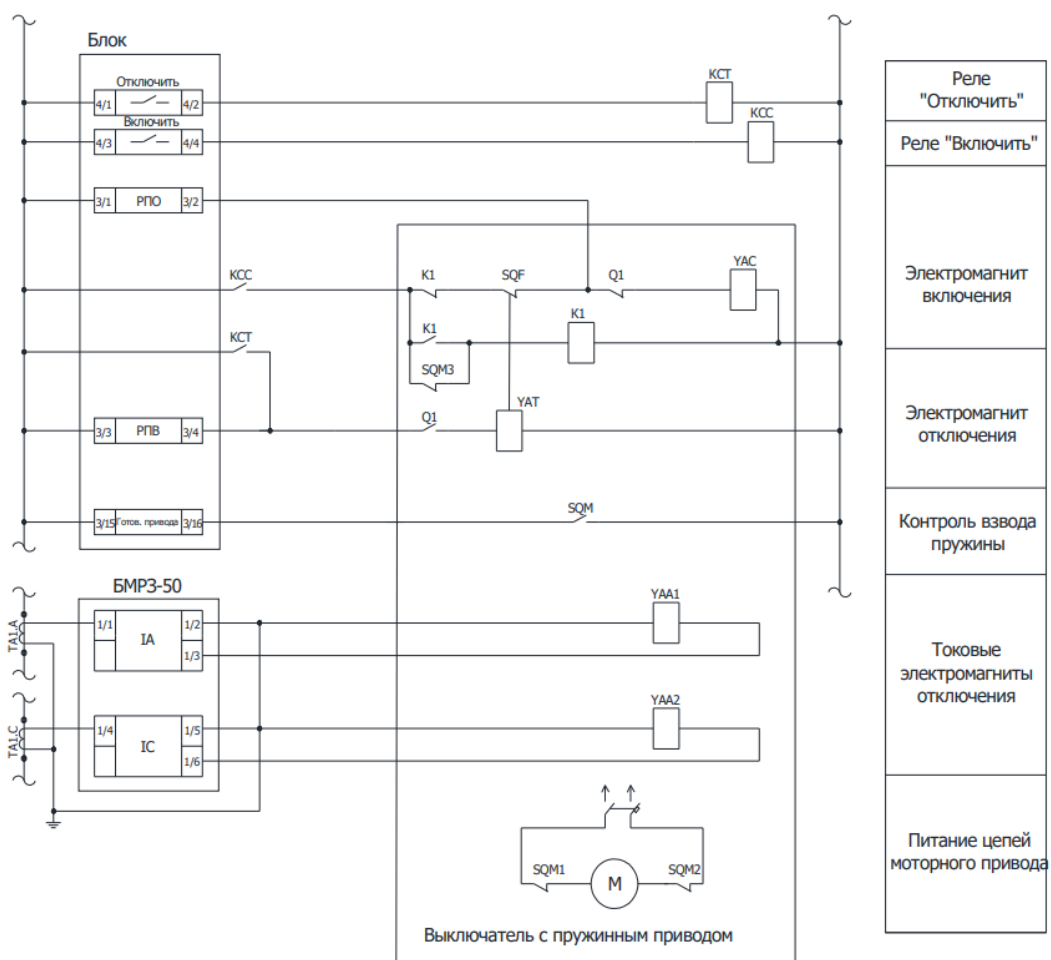


Рисунок 26 – Пример подключения цепей управления выключателем с пружинным приводом

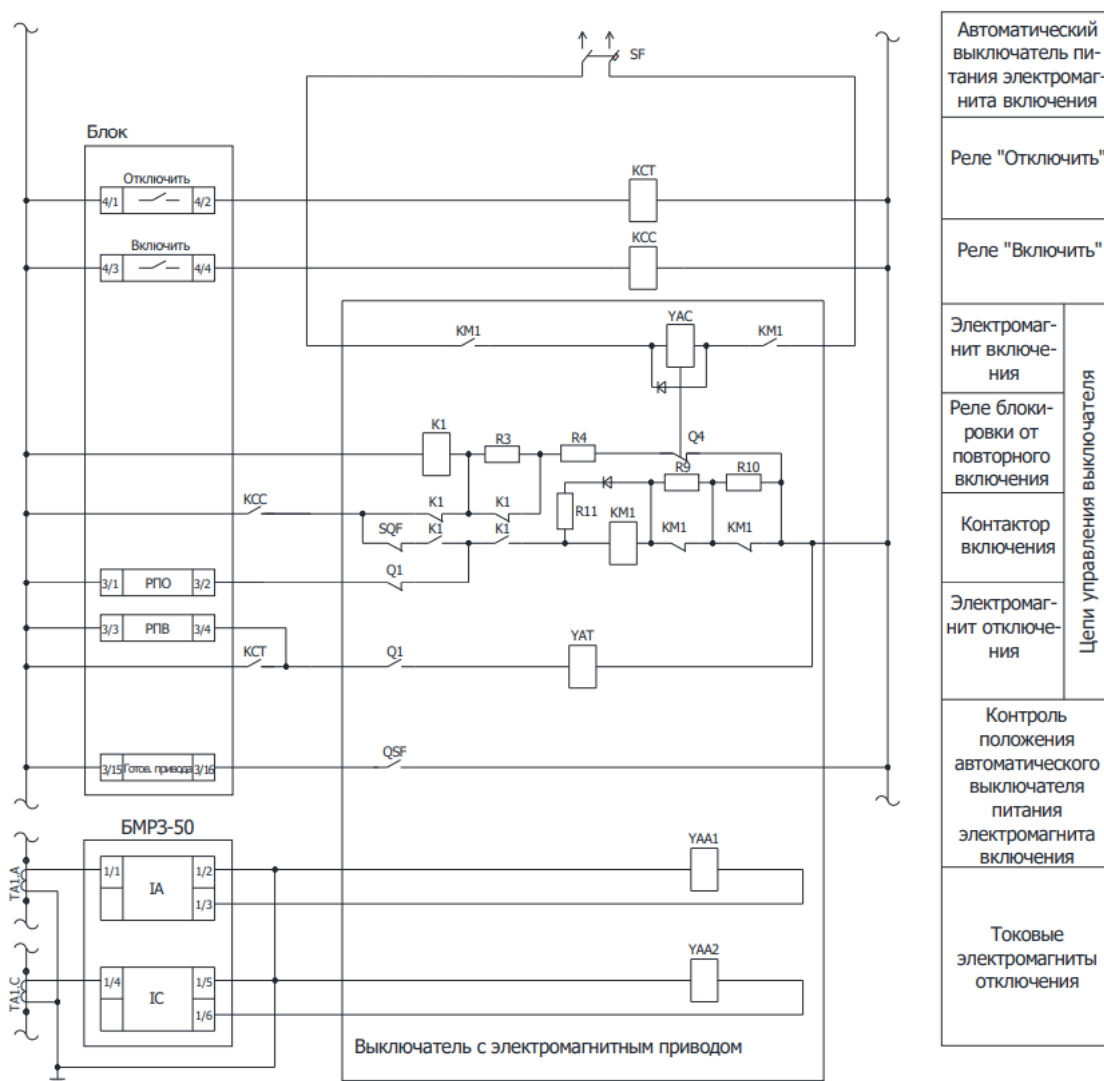


Рисунок 27 – Пример подключения цепей управления выключателем с электромагнитным приводом

Блок обрабатывает внешние сигналы на дискретных входах с максимальной задержкой 40 миллисекунд. В системе предусмотрена защита от ложных срабатываний ("дребезга") выключателя. Если во время подачи команды на включение срабатывает защита, блок автоматически запрещает все дальнейшие команды включения. Этот запрет сохраняется в течение одной секунды после получения команды отключения. Важно отметить, что сигналы отключения всегда имеют более высокий приоритет по сравнению с командами включения.

3.6 Расчет релейной защиты для отходящих линий 10 кВ

В данном пункте произведены расчеты для одной из отходящих линий на «РП-13» (рисунок 28), расчет других отходящих линий производится по аналогичной методике.

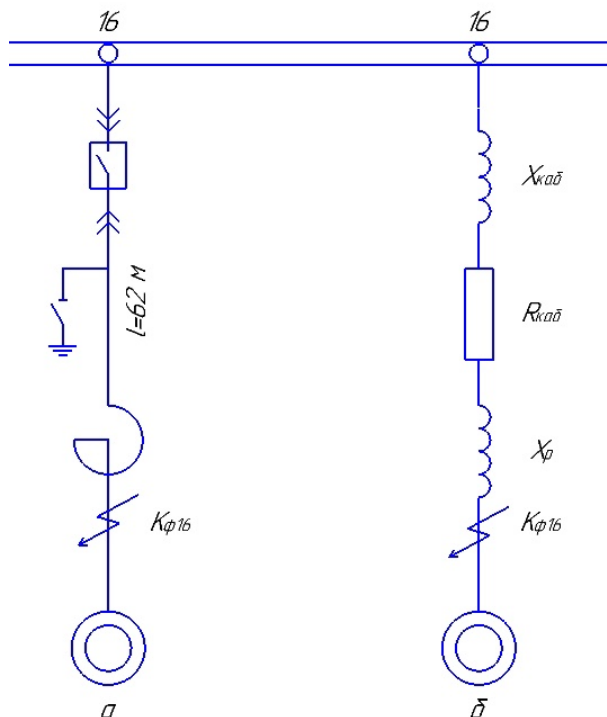


Рисунок 28 – а) электрическая схема «фидер №16», б) схема замещения «фидер №16»

Релейная защита отходящей линии реализована на основе типового шкафа защиты и автоматики типа ШЭ-МТ-015 и блока микропроцессорной релейной защиты БМРЗ-50-2-3-02. Отходящая линия питает компрессор К37 типа К-345-91-1 по кабелю ААШВ-10 3х150 мм².

Параметры линии:

- $R_{уд} = 0,206$ Ом/км – удельное активное сопротивление;
- $X_{уд} = 0,059$ Ом/км – удельное реактивное сопротивление;

- $L = 0,062$ км – длина линии;
- $U_{\text{ср ном}} = 10,5$ кВ – среднее номинальное напряжение;
- $U_{\text{к}} = 8\%$ – напряжение короткого замыкания реактора;

Расчет номинального тока $I_{\text{ном}}$:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср ном}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (11)$$

где P – мощность питаемого компрессора типа К-345-91-1 = 3500 кВт;

$\cos \varphi$ (коэффициент мощности) = 0,85 (стандартное значение для промышленных компрессоров);

η (КПД) = 0,95.

$$I_{\text{ном}} = \frac{3500}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,85 \cdot 0,95} = 229 \text{ А} \quad (11)$$

Максимальный рабочий ток $I_{\text{раб макс}}$ будет на 10–30% выше:

$$I_{\text{раб макс}} = I_{\text{ном}} \cdot 1,3 \quad (12)$$

$$I_{\text{раб макс}} = 229 \cdot 1,3 = 297,7 \text{ А} \quad (12)$$

Расчет полного сопротивления кабельной линии:

$$Z_{\text{к.л.}} = L \cdot \sqrt{R_{\text{уд}}^2 + X_{\text{уд}}^2} \quad (13)$$

$$Z_{\text{к.л.}} = 0,062 \cdot \sqrt{0,206^2 + 0,059^2} = 0,013 \text{ Ом} \quad (13)$$

Расчет сопротивления токоограничивающего реактора:

$$X_{\text{реактора}} = \frac{10 \cdot U_{\text{к}} \cdot U_{\text{ср ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}} \quad (14)$$

$$X_{\text{реактора}} = \frac{10 \cdot 8 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 229} = 2,12 \text{ Ом}$$

Сумма сопротивлений линии:

$$X_{\text{сум}} = Z_{\text{к.л.}} + X_{\text{реактора}} \quad (15)$$

$$X_{\text{сум}} = 0,013 + 2,12 = 2,13 \text{ Ом}$$

Расчет трехфазного тока короткого замыкания $I_{\text{Кф16}}^{(3)}$ в точке $K_{\text{ф16}}$ рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{Кф16}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср ном}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{сум}}} \quad (16)$$

$$I_{\text{Кф16}}^{(3)} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,13} = 2846,1 \text{ А}$$

Расчет двухфазного тока короткого замыкания $I_{\text{Кф16}}^{(2)}$ в точке $K_{\text{ф16}}$ рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{Кф16}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{Кф16}}^{(3)} \quad (17)$$

$$I_{\text{Кф16}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2846,1 = 2464,8 \text{ А}$$

Расчет уставки ТО без выдержки по времени $I_{\text{с.з.}}^I$:

$$I_{с.з.}^I = k_{отс} \cdot I_{КФ16}^{(3)} \quad (18)$$

где $k_{отс}$ - коэффициент отстройки токовой отсечки (1,1 1,3).

$$I_{с.з.}^I = 1,3 \cdot 2846,1 = 3699,93 \text{ А}$$

Расчет уставки срабатывания МТЗ $I_{с.з.}^{II}$:

$$I_{с.з.}^{II} = \frac{k_{отс} \cdot k_{сзп}}{k_{в}} \cdot I_{\text{раб макс}} \quad (19)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки = 1,1;

$k_{сзп}$ – коэффициент самозапуска = 3;

$k_{в}$ – коэффициент самозапуска = 0,9.

$$I_{с.з.}^{II} = \frac{1,1 \cdot 3}{0,95} \cdot 297,7 = 1034,12 \text{ А}$$

Токовая отсечка отстраивается без выдержки по времени.

Проверка чувствительности МТЗ $k_{ч \text{ МТЗ}}$:

$$k_{ч \text{ МТЗ}} = \frac{I_{К1}^{(2)}}{I_{с.з.}^{II}} \quad (20)$$

$$k_{ч \text{ МТЗ}} = \frac{2464,8}{1034,12} = 2,38$$

Коэффициент чувствительности максимальной токовой защиты $\geq 1,2$ – это значит защита удовлетворяет требованиям ПУЭ [8].

Выдержка времени $t_{\text{МТЗ}}$ рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{МТЗ}} = t + \Delta t \quad (21)$$

где t – время срабатывания предыдущей защиты (см. рисунок 10) = 0,5с;

Δt – степень селективности = 0,5 с

$$t_{\text{МТЗ}} = 0,5 + 0,5 = 1 \text{ с}$$

На линии установлен трансформатор тока с коэффициентом трансформации $k_{\text{ТТ}} = \frac{1000}{5}$. Пересчет срабатывания уставок МТЗ во вторичные значения:

$$I_{\text{с.р.}} = \frac{I_{\text{с.з.}}}{k_{\text{ТТ}}} \quad (22)$$

$$I_{\text{с.р.}}^I = \frac{3699,93}{200} = 18,5 \text{ А}$$

$$I_{\text{с.р.}}^{II} = \frac{1034,12}{200} = 5,17 \text{ А}$$

Вывод. В разделе были рассмотрены токовые защиты распределительных сетей, выбрано МП устройство РЗА, а также изучена методика расчета уставок для ввода в вышесказанное устройство: блок микропроцессорной релейной защиты БМРЗ-50-2-3-02 производства НТЦ «Механатроника».

Заключение

Целью выпускной квалификационной работы было повышение эффективности эксплуатации релейной защиты на ГПП 110 кВ автомобильного предприятия за счет внедрения микропроцессорных систем управления.

Содержание данной работы включает в себя анализ схем и устройств релейной защиты, применяемых для отходящих линий 10 кВ распределительных пунктов, с оценкой их эффективности и надежности.

При внедрении микропроцессорной релейной защиты в распределительные сети были применены следующие защитные функции для отходящей линии «фидер №16» на «РП-13»:

- токовая отсечка без выдержки времени (ТО);
- максимальная токовая защита с независимой выдержкой времени (МТЗ).

Для обеспечения вышеуказанных функций релейной защиты был выбран блок БМРЗ-50-2-3-02 и шкаф ШЭ-МТ-015 производства НТЦ «Механотроника». Это оборудование предназначено для защиты внутренних устройств от внешних воздействий и электромагнитных помех (ЭМП), а также для минимизации излучения помех от самого оборудования. В нём размещаются реле, контроллеры, системы связи и серверное оборудование. Совместимость – работа с цепями 24-230 В, цифровые выходы (опционально).

Переход на микропроцессорные защиты – это повышение надежности, снижение эксплуатационных затрат и готовность к цифровизации энергосистем. Для современных сетей 6-10 кВ такие решения становятся не просто предпочтительными, а необходимыми.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-50-2-3-02 [Электронный ресурс]. URL: https://www.mtrele.ru/files/filedoc/releynaya-zashita/bmrz-50/bmrz-50_new.pdf (дата обращения: 15.04.2025).
2. Достоинства и недостатки микропроцессорной РЗА [Электронный ресурс] URL: https://faultan.ru/articles/ide_advantages_disadvantages/ (дата обращения 28.02.2025).
3. Зенина Е. Г. Анализ электромагнитной совместимости микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-elektromagnitnoy-sovmestimosti-mikroprotsessornyh-ustroystv-releynoy-zaschity-i-avtomatiki> (дата обращения. 26.02.2025).
4. Ключников В. Г. Преимущества и недостатки применения микропроцессорных устройств релейной защиты [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-i-nedostatki-primeneniya-mikroprotsessornyh-ustroystv-releynoy-zaschity> (дата обращения 28.02.2025).
5. Малышко Р. В. Ладожинская Д. А. Обзор и сравнения эксплуатации электромеханической и микропроцессорной рза в рф [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-i-sravneniya-ekspluatatsii-elektromehanicheskoy-i-mikroprotsessornoy-rza-v-rf> (дата обращения 27.02.2025).
6. Механотроника интеллектуальные устройства релейной защиты [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mtrele.ru/> (дата обращения: 14.04.2025).
7. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматизации в электроэнергетических сетях [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41721298> (дата обращения: 27.04.2025).
8. Правила устройства электроустановок ПУЭ-6 и ПУЭ-7. М.: Норматика, 2018. 248 с.

9. Реле времени ЭВ-124 [Электронный ресурс] URL: <https://oorza.ru/catalog/product/view/11/148.html> (дата обращения 23.02.25).
10. Реле максимального тока РТ-40 [Электронный ресурс] URL: <https://www.envolga.ru/product/rza/rele-toka/rt-40/?ysclid=m4rem84q4o718170466#desc> (дата обращения 23.02.25).
11. Реле напряжения РН-54/160 УХЛ4 [Электронный ресурс] URL: <https://relevolga34.ru/product/voltage-relay-rn-54-160-un-pris/> (дата обращения 23.02.25).
12. Реле промежуточные двухпозиционные РП 8, 9, 11, 12 [Электронный ресурс] URL: <https://www.cheaz.ru/products/rpd/electromechanical/i-reley/rp-8.html?ysclid=m4rewwqiws948869996> (дата обращения 23.02.25).
13. Релейная защита распределительных сетей 6-10 кВ. Расчёт уставок методические указания [Электронный ресурс] URL: https://www.mtrele.ru/files/project/raschet_ustavok/relejnaya_zashchita_raspredelitnyh_setej.pdf (дата обращения 06.04.25).
14. Самолина О. В., Вахнина В. В. Релейная защита: практикум. Тольятти издательство Тольяттинского государственного университета 2023.
15. Типовой шкаф защиты и автоматики линии 6-35 кВ типа ШЭ-МТ-015 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mtrele.ru/shop/tipovyye-shkafyi-rza/tipovoj-shkaf-zashhityi-i-avtomatiki-linii-6-35-kv-tipa-she-mt-015.html> (дата обращения: 15.04.2025).
16. Ali Hasan, Linda Dlamini. Overcurrent Protection Philosophy Using Microprocessor Based Relays for a South African Power Distribution Network [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9041097> (дата обращения 01.03.2025)
17. Bamdad Falahati, Poria Fajri, Sohrab Faramarzi, Md. Rasheduzzaman. A Modular, Scalable Automation System for a Distribution Substation [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9917054> (дата обращения 01.03.2025)

18. Bayazıt Ant İlhan. IEC61850 Based Substation Automation and Centralized Protection & Control Concept [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10847129> (дата обращения 01.03.2025)

19. Jose Ruiz, Montie Smith. Virtual Protection Relay: Myth or Reality? [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10743011> (дата обращения 02.03.2025)

20. Pankaj Kumar Jh, Jiten Das, Mayank Rana. Guardians of Grid Resilience: Real-World Lessons from Digital Relay Data in Indian Power Sector [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10987067> (дата обращения 03.03.2025)