

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

Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование кафедры)

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
(код и наименование направления подготовки)
Электроснабжение
(направленность (профиль))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Реконструкция электрической части распределительного устройства
6 кВ Тольяттинской ТЭЦ ПАО "Т Плюс"»

Студент

Л.В. Лазуко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.В. Черненко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« » 20 г.

Тольятти 2019

АННОТАЦИЯ

В данной бакалаврской работе были разработаны предложения по реконструкции оборудования для секции 6Р Тольяттинской теплоэлектроцентрали (ТотЭЦ) с заменой установленных масляных выключателей на более перспективные вакуумные, имеющие большую отключающую способность токов короткого замыкания, что позволит увеличить надежность.

Во введении кратко описано существующее положение в энергетике страны, требования и факторы, определяющие надежность энергосистем.

В основной части бакалаврской работы были рассчитаны токи короткого замыкания и по ним произведен выбор оборудования. Рассмотрены конструкции, принцип действия, технические характеристики и преимущества вакуумного оборудования, а также дана характеристика релейной защиты и автоматики, применяемой в секции 6Р, предложены к установке микропроцессорные терминалы, взамен установленных в настоящее время электромеханических реле.

Пояснительная записка содержит 52 листа. Графическая часть выполнена на 6 листах формата А1.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение..... | 4 |
| 1. Анализ оборудования и схемы электрических соединений секции 6Р ТоТЭЦ | 6 |
| 2. Предложения по замене выключателей..... | 9 |
| 3. Расчет токов короткого замыкания..... | 14 |
| 4. Выбор оборудования секции 6Р | 18 |
| 5. Анализ релейной защиты и автоматики, предложения по ее модернизации..... | 22 |
| 6. Расчёт уставок релейной защиты..... | 37 |
| Заключение | 48 |
| Список используемых источников..... | 49 |

ВВЕДЕНИЕ

Энергетический сектор нашей страны обеспечивает жизнедеятельность всех отраслей национального хозяйства, от энергетического сектора зависят основные финансово-экономические показатели страны и качество жизни населения. На сегодняшний день российская энергетика - это 600 тепловых, 100 гидравлических, 9 атомных электростанций.

Большинство электростанций были построены более 25 лет назад, часть из них уже прошла реконструкцию, часть еще нет. Наиболее дешевым и экологичным способом генерации являются гидроэлектростанции, однако их недостаток в том, что для строительства требуются огромные затраты и наличие природных гидроресурсов. Большая часть гидроэлектростанций уже полностью или частично реконструированы. Атомные электростанции обладают колоссальными возможностями для генерации, практически не зависят от ландшафта и немногим дешевле гидроэлектростанций. Большой минус – потенциальный вред окружающей среде и необходимость утилизации урановых стержней. Большинство станций в России – тепловые. Тепловые станции строятся вблизи центра нагрузок, выработка электроэнергии на них совмещается с производством горячей воды. Данные станции не зависят от весеннего паводка. Минусы – при работе на угле или мазуте – загрязняют окружающую среду.

Основной на сегодняшний день задачей российской электроэнергетики является реконструкция существующих энергообъектов.

«В условиях нехватки генерирующих мощностей, наличия изношенного оборудования электростанций и подстанций, плачевного состояния магистральных и распределительных электросетей электросетевые компании фактически ведут борьбу за выживание» [15].

«Оборудование энергосистемы России зачастую исчерпало свои запасы по ресурсу работы, а также морально и физически устарело. Результатом такой бездеятельности становятся различные системные аварии» [15].

Один из ярких примеров - происшедшая авария на Саяно-Шушенской ГЭС, ее разрушительные последствия, показали, насколько важным является своевременная замена или ремонт изношенного оборудования.

Анализ и оценка системы электроснабжения по параметрам надежности, для обеспечения бесперебойного производства и передачи электроэнергии, а также своевременной модернизации оборудования, являются, в настоящее время, приоритетными.

Одним из крупнейших генерирующих объектов энергосистемы Самарской области является Тольяттинская ТЭЦ. Ввод в эксплуатацию последнего турбогенератора на ТоТЭЦ состоялся в 1975г. Расчетный срок службы оборудования – 25 лет, большинство из которого не менялось по настоящее время. За последние 5 лет участилось количество технологических нарушений, связанных с отказами оборудования, большинство оборудования морально и физически устарело, в связи с чем требуется его замена.

Наименее «безболезненно» для жизнедеятельности энергообъекта проходит точечная реконструкция (поочередная замена оборудования), при этом энергообъект остается в работе, персонал не простаивает, в итоге эффект такой же как и после тотальной реконструкции, при меньшем числе приработочных отказов оборудования.

В данной бакалаврской работе предлагается заменить масляные устаревшие выключатели и электромеханическую релейную защиту, установленные в секции 6Р ТоТЭЦ, на цифровые микропроцессорные реле и современные вакуумные выключатели.

Целью работы является повышение надёжности потребителей секции 6Р, снижение ущерба при аварийных режимах за счёт применения надежных микропроцессорных терминалов РЗиА и современных быстродействующих вакуумных выключателей.

1 Анализ оборудования и схемы электрических соединений секции 6Р ТоТЭЦ

Секция 6Р предназначена для электроснабжения части потребителей собственных нужд станции, в том числе и наиболее ответственных, таких как питающий электронасос парового котла, дробилка молотковая (служит для измельчения угля на куски размером 25мм), дымососы (служат для отвода газообразных продуктов сгорания из котла), дутьевые вентиляторы (нагнетают воздух в котел). Схема питания собственных нужд должна обеспечивать безотказную работу электростанции.

Электрическая схема секции 6Р представляет собой одну секцию шин, запитанную от ячейки 37 генераторного распределительного устройства (рабочий ввод). Предусмотрено резервное питание секции 6Р от секции 20ШР (резервный ввод), секция 20ШР запитана от ячейки 54 генераторного распределительного устройства. Также секция 20ШР может получать питание от РТСН-110/6 В секции 6Р предусмотрены резервные ячейки, что позволяет легко приспособить схему к присоединению новых потребителей. Любой из выключателей секции 6Р может быть взят в ремонт путем выкатывания его в ремонтное положение.

Безопасность обслуживания РУ зависит от простоты и наглядности схемы. Наглядность схемы и ее хорошая обзорность значительно повышает оперативную надежность, уменьшает вероятность ошибочных действий персонала.

Схема электрических соединений секции 6Р ТоТЭЦ остается прежней, т.к. она проста, надежна, маневренна и наглядна.

Схема электрических соединений секции 6Р ТоТЭЦ приведена на рисунке 1.

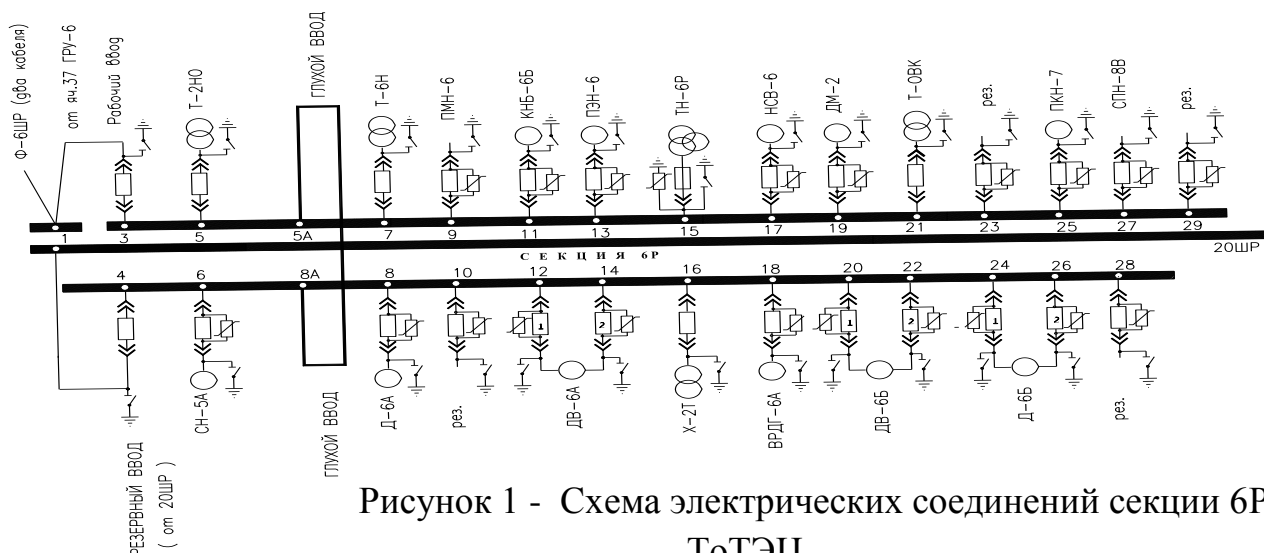


Рисунок 1 - Схема электрических соединений секции 6Р
ТотЭЦ

В секции собственных нужд 6Р установлены масляные выключатели 1970 года выпуска. Оборудование секции 6Р и отходящих линий защищается релейной защитой на электромеханической базе. Секция 6Р расположена в котлотурбинном цехе и работает в условиях вибрации и повышенных температур. Наличие вибрации обуславливает меньшие интервалы между тех обслуживаниями и, в последние года, наблюдается дефицит запасных частей, что говорит о том, что оборудование устарело морально. Физическое устаревание подтверждается тяжелыми условиями эксплуатации и почти двукратным превышением срока службы оборудования (около полувека).

«С начала 1980-х годов цифровая аппаратура релейной защиты во всех странах мира вытесняет с рынка традиционные электромеханические и полупроводниковые аналоговые реле. В России этот процесс начался с небольшой задержкой, но сейчас набирает темпы: в разных регионах страны выполнено несколько крупных проектов оснащения электроподстанций и электростанций серийными цифровыми реле, освоен промышленный выпуск отечественных цифровых реле, накоплен опыт эксплуатации этих реле. Отказ от электромеханических и статических реле, обладающих значительными габаритами, позволил более компактно размещать оборудование на панелях РЗА. Такие конструкции стали занимать значительно меньше места. При

этом управление посредством сенсорных кнопок и дисплея стало более наглядным и удобным.

Цифровые реле защиты, а также многофункциональные терминалы защиты и управления, обладают свойствами, которые и определяют их преимущество в сравнении с традиционными аналоговыми реле, электромеханическими и полупроводниковыми. Причем одни достоинства цифровых реле наиболее ярко проявляются в сфере их промышленного изготовления, другие – в сфере использования в действующих электроустановках» [9].

Микропроцессорные терминалы РЗиА производятся на автоматизированном производстве, что позволяет стандартизировать комплектующие изделия, обеспечить поэтапный технический контроль при изготовлении реле и, тем самым, обеспечить высокую надежность длительного функционирования этих реле.

Устаревшие масляные выключатели планируется заменить на вакуумные.

«Простая кинематическая схема выключателей и применение в приводе магнитной защелки обеспечивают им высокую механическую надежность и большой срок службы. Изоляция выключателей имеет повышенную электропрочность, что обеспечивает их надежную работу в самых тяжелых условиях. Малые габариты и вес позволяют легко встраивать выключатели КРУ и КСО. Выключатели имеют сертификат качества системы ГОСТ Р и международный сертификат качества и производства ISO 9002, выданный испытательным центром КЕМА (Голландия)» [14].

Вакуумные выключатели - это лучшее соотношение цена – качество, простота конструкции, хороший теплоотвод рабочих поверхностей, высокий коммутационный ресурс, высокая надежность.

2 Предложения по замене выключателей

В классе напряжения 10кВ наиболее технологичным является вакуумный тип выключателей, т.к. при данном принципе гашения дуги достигается наибольший ток отключения по сравнению с выключателями других типов. Вакуумные выключатели просты и надежны по конструкции, обладают высоким коммутационным ресурсом. Если сравнивать вакуумные и элегазовые выключатели, то в помещениях закрытого типа, которым является секция 6Р, при установке элегазовых выключателей пришлось бы оборудовать вытяжную вентиляцию (требование ПТЭ) и датчики наличия элегаза на уровне пола, с целью предупреждения рисков для здоровья персонала при утечке элегаза (элегаз тяжелее воздуха и вдохнув его, есть риск погибнуть от удушья, так как воздухом из легких человека элегаз не вытеснить). За элегазовым оборудованием требуется постоянный контроль на предмет наличия должного давления элегаза в дугогасительной камере. Элегазовый выключатель обладает меньшим по сравнению с вакуумным коммутационным ресурсом. Таким образом, в секции 6Р, по экономическим и ремонтнопригодным соображениям предлагается к установке вакуумный тип выключателей. К сравнению не берется масляный тип выключателей, так как данный тип выключателей требует значительно больших затрат на обслуживание чем рассмотренные выше элегазовые и вакуумные выключатели.

Рассмотрим выключатели производителей «Электрощит» г.Самара (ВВЕ-СЭЩ 10 кВ), «ТавридаЭлектрик» г.Севастополь (ВВ TEL-10), АВВ Швейцария (производство выключателей АВВ VM1 передано в Чешскую республику, г.Брно). Сравнительные характеристики будут приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 - Основные технические характеристики вакуумных выключателей

| Параметр | Паспортное значение | | |
|----------------------------------------------------------------|---------------------|------------|---------|
| | ВВ TEL-10 | ВВЕ-СЭЩ 10 | ABB VM1 |
| Номинальный ток, А | 3150 | 2500 | 2500 |
| Номинальный ток отключения, кА | 31,5 | 31,5 | 40 |
| Ток термической стойкости (3с), кА | 31,5 | 31,5 | 40 |
| Сквозной ток короткого замыкания, кА | 80 | 79 | 100 |
| наибольший пик периодическая составляющая | 31,5 | 31,5 | 40 |
| Ресурс по коммутационной стойкости при номинальном токе, "ВО". | 30000 | 10000 | 30000 |
| Механический ресурс циклов ВО | 30000 | 10000 | 30000 |

Как видно из сравнительного анализа, по способности отключения токов короткого замыкания лидирует АBB, однако по номинальному току в лидерах ВВ TEL. Выключатели завода Электроцит проигрывают по коммутационному и механическому ресурсу.

Проанализировав принцип действия и особенности конструкции вакуумных выключателей, было установлено, что единственная компания в мире, которая производит вакуумные выключатели с наружным сильфоном это Таврида Электрик. Сильфон выполнен полностью сварной конструкцией.

Данное техническое решение существенно увеличивает механический ресурс дугогасительной камеры и сказывается положительным образом на надежности выключателя в целом. Данный производитель является отечественным г.Севастополь (что гарантирует более низкую цену по сравнению с зарубежными аналогами) и на рынке с вакуумными выключателями работает с 1995г (накоплен значительный опыт).

Ввиду высокой важности реконструируемого энергообъекта для энергосистемы и высокой значимости секции 6Р для собственных нужд ТoТЭЦ принято решение рассмотреть Вакуумные выключатели серии ВВ/TEL производителя Таврида электрик.

Вакуумные выключатели серии ВВ/TEL являются коммутационными аппаратами нового поколения, предназначенными для электрических цепей с изолированной нейтралью в сетях трехфазного переменного тока 50 Гц с номинальным напряжением 10 кВ, позволяющие коммутировать большие токи и нагрузки, а также отключать нагрузку до 20 мВА.

«Достоинствами выключателей ВВ/TEL являются: - простая конструкция привода с магнитной защелкой и высокая надежность в работе; - большой коммутационный и механический ресурсы; - малые габариты и вес; - возможность работы в любом пространственном положении; - удобство установки во все типы КРУ и КСО; - малое потребление тока при включении и отключении (10 и 1,5А); - возможность управления по цепям постоянного и переменного оперативного тока; - защищенность основных узлов от дуговых и механических воздействий; - низкая трудоемкость производства; - умеренная цена.» [15]

«Выключатели серии ВВ/TEL являются выключателями нового поколения, в которых реализованы самые современные достижения в вакуумной коммутационной технике и электромеханике, позволившие создать аппараты наиболее высокого технического уровня, не требующие ремонта в течение всего срока службы» [14].

Конструкция ВДК.

Корпус ВДК состоит из двух керамических изоляторов и медного цилиндра, припаиваемого к изоляторам. Конструктивными особенностями ВДК являются чашеобразная форма керамических изоляторов и сварной сильфон, значительно снизившие вес и габариты ВДК. Сильфон (гибкий элемент токоведущей шины) припаивается к изолятору и выводу, обеспечивая возможность перемещения подвижного контакта без нарушения герметичности ВДК.

На торцевые части неподвижного и подвижного контактов припаяны пластины из металлокерамики, обеспечивающие им высокую износостойкость. Выводы их служат для соединения с выводами выключателя. Аксиальное магнитное поле (вектор поля направлен от одного контакта к другому) в межконтактном промежутке создается путем выполнения в контактах специальных разрезов. За счет чего дуга не контрагируется (не собирается в пучок), а находится в диффузном (рассеянном) состоянии на всей поверхности контактов, что значительно снижает износ контактов, а, следовательно, повышает отключающую способность и коммутационный ресурс выключателя.

Устройства управления высоковольтным выключателем

«Устройства управления вакуумными выключателями являются их неотъемлемой частью и изготавливаются в виде отдельных блоков, устанавливаемых в релейных отсеках КРУ, на панелях камер КСО или на выкатных элементах КРУ. Они обеспечивают включение и отключение ВВ от источника постоянного, выпрямленного или переменного оперативного тока, блокировку от повторного включения ВВ, отключение от трансформаторов тока при отсутствии напряжения питания, а также ряд дополнительных функций» [14].

Изготавливаются два типа блоков управления: ВУ/TEL-220-05А и ВУ/TEL-12. Второй блок выполняет больше функций, чем первый, в т.ч. контроль исправности цепей электромагнитов выключателя, сигнализацию

об аварийном отключении выключателя и об отсутствии напряжения питания, аварийное отключение.

БУ/TEL-12 имеет низковольтный вход (12-24 В), с помощью которого можно оперировать выключателем при отсутствии напряжения на подстанции, используя для этого обычные элементы питания. Для выполнения такой функции блоком ВU/TEL-220-05А необходимо дополнительно применять блок питания ВР/TEL-220-02А

Эксплуатационные качества выключателей.

«Простая кинематическая схема выключателей и применение в приводе магнитной защелки обеспечивают им высокую механическую надежность и большой срок службы. Изоляция выключателей имеет повышенную электропрочность, что обеспечивает их надежную работу в самых тяжелых условиях. Малые габариты и вес позволяют легко встраивать выключатели КРУ и КСО. Выключатели имеют сертификат качества системы ГОСТ Р и международный сертификат качества и производства ISO 9002, выданный испытательным центром КЕМА (Голландия)» [19].

Таким образом, к установке в секции 6Р предлагаются вакуумные выключатели ВВ/TEL , так как это лучшее соотношение цена – качество. Простота конструкции. Высокий коммутационный ресурс. Высокая надежность.

Выключатели предлагаются к установке с блоком управления БУ/TEL, что обеспечит выполнение следующих функций:

- дистанционное управление выключателем;
- блокировку повторных включений;
- блокировку включения выключателя при наличии команды отключения;
- контроль исправности цепи электромагнитов выключателя;
- сигнализацию внешних неисправностей цепей управления, а также внутренних неисправностей;
- сигнализацию аварийного отключения выключателя.

3 Расчет токов короткого замыкания

Для выбора оборудования, необходимого для реконструкции секции 6Р необходимо рассчитать токи КЗ, по которым затем будет произведено сравнение технических характеристик оборудования и выбрано наиболее подходящее по условиям эксплуатации.

Определяется сопротивление элементов схемы.

а) Сопротивление реактора:

$$X_1 = \frac{X_p \% \cdot U_{н.р.}}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_n}$$

$$X_1 = \frac{8 \cdot 6,3}{1,73 \cdot 100 \cdot 1,5} = 0,1942 \text{ Ом}$$

где $U_{н.р.}$ – номинальное напряжение реактора, кВ;

I_n – номинальный ток реактора, кА;

X_p – реактивность реактора, % .

б) Сопротивление трансформатора Т-6Н:

$$X_2 = \frac{U_k \% \cdot U_6^2}{100 \cdot S}$$

$$X_2 = \frac{7,85 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 0,75} = 4,1542 \text{ Ом}$$

где U_k – напряжение короткого замыкания, %;

U_6 – базисное напряжение, кВ;

S – мощность трансформатора, кВА .

в) Сопротивление самозапуска секции 0,4кВ:

$$X_3 = \frac{U_H}{I_{\text{сам}} \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{U_6^2}{U_H}$$

$$X_3 = \frac{6}{0,34 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{6,3^2}{6} = 11,22 \text{ Ом}$$

где U_H – номинальное напряжение, кВ;

U_6 – базисное напряжение, кВ;

$I_{\text{сам}}$ – групповой ток самозапуска (ток 0,4кВ приведен к стороне 6кВ и равен 340А, данные взяты из проекта), кА.

г) Сопротивление самозапуска секции 6Р :

$$X_4 = \frac{U_H}{I_{\text{пуск.сум}} \cdot \sqrt{3}}$$

$$X_4 = \frac{6,3}{4326 \cdot \sqrt{3}} = 0,8418 \text{ Ом}$$

где U_H – номинальное напряжение секции, кВ;

$I_{\text{пуск сум}}$ – суммарный пусковой ток потребителей секции 6Р, кА.

д) Эквивалентное сопротивление секции 6Р:

$$X_{\text{ЭКВ}} = \frac{X_1 + X_3 \cdot X_4}{X_2 + X_3 + X_4}$$

$$X_{\text{ЭКВ}} = \frac{4,1542 + 11,22 \cdot 0,8418}{4,1542 + 11,22 + 0,8418} = 0,8143 \text{ Ом}$$

где X_1 - сопротивление реактора, Ом;

X_2 - сопротивление трансформатора, Ом;

X_3 – Сопротивление самозапуска секции 0,4кВ, Ом;

X_4 - Сопротивление самозапуска секции 6Р, Ом.

е) Расчетное сопротивление Фидера-бШР при самозапуске рассчитаем по формуле:

$$X_{\text{расч}} = X_1 + X_{\text{экв}}$$

$$X_{\text{расч}} = 0,1942 + 0,1843 = 1,0045 \text{ Ом}$$

где X_1 - сопротивление реактора, Ом;

$X_{\text{экв}}$ - эквивалентное сопротивление секции бР, Ом.

ж) Суммарный пусковой ток:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{н}}}{X_{\text{расч}} \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_{\text{пуск}} = \frac{6,3}{1,0045 \cdot \sqrt{3}} = 2,92 \text{ кА}$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение, кВ;

$X_{\text{расч}}$ – расчетное сопротивление фидера бШР при самозапуске, Ом.

и) Остаточное напряжение на Фидере – бШР во время наиболее тяжелого пуска:

$$U_{\text{ост}} = U_{\text{н}} \cdot \frac{X_{\text{экв}}}{X_{\text{расч}}}$$

$$U_{\text{ост}} = 6,3 \cdot \frac{0,1843}{1,0045} = 5,1 \text{ кВ}$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение, кВ;

$X_{\text{расч}}$ – расчетное сопротивление Фидера-бШР при самозапуске, Ом;

$X_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление секции бР, Ом;

Таким образом, остаточное напряжение на шинах составит 80% от номинального.

к) Ток короткого замыкания на шинах 6,3 кВ за реактором:

$$I_{к.з.}^3 = \frac{I_{нр} \cdot 100}{X_p \%}$$

$$I_{к.з.}^3 = \frac{1500 \cdot 100}{8} = 18750 \text{ А}$$

где $I_{нр}$ – номинальный ток реактора, А;

X_p – реактивность реактора, % .

к) Ток двухфазного короткого замыкания на шинах 6,3 кВ за реактором:

$$I_{к.з.}^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{к.з.}^3$$

$$I_{к.з.}^2 = 0,866 \cdot 18750 = 16330 \text{ А}$$

где $I_{\text{э.с.}}^3$ – ток трехфазного короткого замыкания на шинах 6,3 кВ за реактором, А.

4 Выбор оборудования секции 6Р

Полный выбор выключателя ВВ/TEL-10-20/1000 У2 выполняется для вводного выключателя секции 6Р ТоТЭЦ.

Условия выбора:

1. По напряжению установки:

$$U_{уст.} \leq U_{ном.}$$

$$6кВ \leq 10кВ$$

2. По длительному току:

$$I_{норм.} \leq I_{ном.}$$

$$0,917кА \leq 3,15кА$$

$$I_{раб.мах.} \leq I_{ном.}$$

$$2,92кА \leq 3,15кА$$

3. По отключающей способности:

$$I_{п.т.} \leq I_{отк.ном.}$$

$$16,3кА \leq 31,5кА$$

4. Проверяем возможность отключения асимметричного тока КЗ (полного тока К.З. с учетом апериодической составляющей):

$$i_{к.з.} \leq i_{а.ном.}$$

$$18,75 кА \leq 31,5 кА$$

5. По включающей способности:

$$I_y \leq i_{пик.вкл}$$

$$68,8 кА \leq 80 кА$$

6. На электродинамическую стойкость выключатель проверяем по предельным сквозным токам К.З.:

$$I_{п.о} \leq I_{дин.}$$

$$24,95кА \leq 31,5кА$$

$$i_y \leq i_{дин.пик.}$$

$$68,8кА \leq 80кА$$

Выключатель ВВ/TEL-10-20/1000 У2 удовлетворяет условиям выбора, что позволяет окончательно принять его к установке в секции 6Р ТоТЭЦ вводным выключателем.

Выбор остальных выключателей в секции 6Р ТоТЭЦ выполняется аналогично. К установке в секции 6Р ТоТЭЦ приняты выключатели типа ВВ/TEL-10-20/1000 У2.

Далее произведем выбор трансформаторов тока

Для установки в секции 6Р выбираем трансформаторы тока типа ТПОЛ-10

Условия выбора:

1. По напряжению установки:

$$U_{\text{уст.}} \leq U_{\text{ном.}}$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ}$$

2. По длительному току:

$$I_{\text{раб. макс.}} \leq I_{\text{ном.}}$$

$$2,92 \text{ кА} \leq 5 \text{ кА}$$

3. По динамической устойчивости:

$$i_y \leq R_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{ном.}}$$

$$63,98 \text{ кА} \leq 80 \text{ кА}$$

4. По термической стойкости:

$$W_k \leq I_T^2 \cdot t_T$$

$$106,6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 18,2^2 \cdot 3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$106,6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 993,72 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

5. По вторичной нагрузке трансформатора тока:

Таблица 4 - Вторичная нагрузка трансформатора тока ТПОЛ-10

| прибор | тип | Нагрузка, В·А | | |
|----------------------------|-------|---------------|--------|--------|
| | | Фаза А | Фаза В | Фаза С |
| Амперметр | Э-335 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Ваттметр | Д-335 | 0,5 | – | 0,5 |
| Варметр | Д-335 | 0,5 | – | 0,5 |
| Датчик активной мощности | – | 0,5 | – | 0,5 |
| Датчик реактивной мощности | – | 0,5 | – | 0,5 |
| Счетчик активной энергии | И-680 | 2,5 | – | 2,5 |
| Счетчик реактивной энергии | И-676 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Ваттметр (машинный зал) | Д-305 | 0,5 | – | 0,5 |
| Итого | | 8,0 | 3,0 | 8,0 |

Из таблицы 4 видно, что наиболее загружены трансформаторы тока фаз А и С.

Общее сопротивление приборов:

$$r_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_2^2} = 8/25 = 0,32 \text{ Ом.}$$

Вторичная номинальная нагрузка трансформатора тока в классе точности 0,5 по паспорту составляет 0,8 Ом. Сопротивление контактов принимаем 0,1 Ом, тогда сопротивление проводов следующее:

$$r_{\text{пр}} = z_{2\text{н}} - r_{\text{приб}} - r_{\text{к}} = 0,8 - 0,32 - 0,1 = 0,38 \text{ Ом}$$

Принимая длину соединительных проводов с медными жилами 50м. определяем сечение:

$$q = \frac{\rho \cdot l_{\text{дл}}}{r_{\text{ю}}} = \frac{0,0175 \cdot 50}{0,38} = 2,31 \text{ мм}^2.$$

Принимаем контрольный кабель КВВГ с жилами сечением 2,5 мм².

Трансформатор тока ТПОЛ-10 удовлетворяет условиям выбора, что позволяет окончательно принять его к установке в секции 6Р ТоТЭЦ.

Выбор остальных трансформатора тока секции 6Р ТоТЭЦ выполняется аналогично. К установке в секции 6Р приняты трансформатора тока ТПОЛ-10.

5 Анализ релейной защиты и автоматики, предложения по ее модернизации

«Устройства РЗА на протяжении прошлого века выполнялись на аналоговой аппаратуре, конкретно на электромеханических токовых реле прямого или косвенного действия типов РТВ, РТМ, РТ-80, РТ-40, реле времени РВ и т. п. И лишь с 80-х годов прошлого века начали широко использоваться цифровые (микропроцессорные) реле, правильнее сказать цифровые многофункциональные терминалы разных фирм типов SPAC (АББ), SEPAM («Шнайдер электрик»), SIPROTEC («Сименс»), Сириус («Радиус»), БМРЗ («Механотроника») и др.» [18].

Цифровые реле защиты, а также многофункциональные терминалы защиты и управления, обладают многими свойствами, которые и определяют их преимущество в сравнении с традиционными аналоговыми реле, электромеханическими и полупроводниковыми. Причем одни достоинства цифровых реле наиболее ярко проявляются в сфере их промышленного изготовления, другие – в сфере использования в действующих электроустановках.

Микропроцессорные терминалы РЗА производятся на автоматизированном производстве, что позволяет стандартизировать комплектующие изделия, обеспечить поэтапный технический контроль при изготовлении реле и, тем самым, обеспечить высокую надежность длительного функционирования этих реле. Кроме того, небольшие габариты и вес современной цифровой аппаратуры уменьшают затраты на их транспортировку на дальние расстояния.

В секции 6Р ТоТЭЦ с момента ввода в эксплуатацию установлены электромеханические устройства РЗА. Максимальная токовая защита, максимальная токовая отсечка, токовая защита нулевой последовательности реализованы на базе реле РТ-40. Защита от повышения и от понижения напряжения реализованы на базе реле РН-60. Выдержка времени достигается при помощи реле РВ-100. Направленность защитами придается при помощи

реле мощности. Максимальная токовая защита части присоединений выполнена на базе реле РТ-80.

Ввиду тяжелых условий эксплуатации, таких как повышенная влажность, высокие температуры, вибрация, а так же большого срока службы (более 25 лет) электромеханические УРЗА секции 6Р нуждаются в замене.

Наиболее технологичными и функциональными являются микропроцессорные терминалы.

Вновь введенные защиты обеспечат безотказную работу при штатных и внештатных ситуациях во время функционирования оборудования.

Для пользователей достоинства цифровых реле столь обширны, что их подробное описание заняло бы десяток страниц. Основные достоинства цифровых реле заключаются в следующем:

«- самодиагностика. Непрерывная автоматическая самопроверка цифровых реле позволяет персоналу быть уверенным в их исправном состоянии и в надежности срабатывания при коротких замыканиях. Этим обеспечивается сохранность электрооборудования, устраняется возможность излишних погашений потребителей и, следовательно, ущербов от недостаточности отпуска электроэнергии;

- совмещение функций управления, контроля и защиты электроустановок. В каждом цифровом многофункциональном устройстве (терминале) это позволяет создавать на их основе нижний уровень АСУ – автоматизированной системы управления технологическими процессами энергетического или другого объекта;

- ускорение отключения коротких замыканий, которое достигается возможностью использования различных времятоковых характеристик, трех ступеней токовых защит, минимальных ступеней селективности (0,15-0,2с), ускорения защиты после АПВ, а также двух различных наборов уставок, автоматически сменяемых при изменении режима питания электроустановки;

- сокращение расходов при сооружении энергетических объектов и при их обслуживании;

- обеспечение безопасности оперативного и релейного персонала за счет дистанционного обслуживания электроустановок.

Из этого, далеко неполного, перечня достоинств цифровой техники релейной защиты и управления видно, насколько важны изучение и практическое освоение новейшей техники РЗА и ее программного обеспечения» [9].

Замена электромеханических реле, установленных в секции 6Р ТоТЭЦ на микропроцессорные позволит усилить такие виды защит как:

- МТЗ, МТО, защита от замыканий на землю; (реализованы на микропроцессорных терминалах REJ-525 производитель АВВ, Швейцария);

- защита минимального напряжения; защита от понижения линейных напряжений (разрешение работы АВР), защита максимального напряжения нулевой последовательности (реализованы на микропроцессорных терминалах ТЕМП-2501 производитель ООО «Энергосистемы» г.Чебоксары);

- дифференциальная защита с торможением (реализованы на микропроцессорных терминалах SPAD-346С производитель АВВ, Швейцария);

- логическая защита шин - выполнена на всех отходящих присоединениях секции 6Р. Принцип работы: если есть повреждение на отходящей линии, то работают пусковые органы защиты отходящей линии и блокируют МТЗ ввода. Если есть повреждение на шинах, то блокирующий сигнал со стороны отходящих линий отсутствует и срабатывает МТЗ ввода;

- защита от дуговых замыканий. В каждой ячейке секции 6Р установлено два датчика дуговой защиты, выполненных на фототеристорах, реагирующих на световой поток электрической дуги. Один датчик расположен в отсеке ввода (кабельной сборке). Второй датчик расположен в отсеке камеры вакуумного выключателя. При срабатывании датчика подается импульс на выходное реле и отключается присоединение, где установлен датчик

Вновь введенные микропроцессорные защиты обеспечат безотказную работу при штатных и не штатных ситуациях работы оборудования.

Возможности микропроцессорных терминалов позволяют объединить огромное количество функций в одном терминале и настроить конкретный терминал под заданные условия.

а) Максимальная токовая защита.

Превышение хотя бы одним из фазных токов уставки тока срабатывания второй ступени $I_{>}$, вызывает через выдержку уставки времени пуска 55 мс появление сигнала пуска ступени. По истечении установленного времени срабатывания при использовании независимой характеристики или вычисленного времени срабатывания при использовании обратозависимой характеристики ступень срабатывает. Аналогично, первая ступень $I_{>>MTЗ}$ вырабатывает сигнал пуска ступени через выдержку уставки тока срабатывания. По истечении времени срабатывания ступень срабатывает. Вторая ступень модуля может иметь независимую или обратозависимую характеристику срабатывания. При выборе обратозависимой характеристики доступны шесть групп кривых. Работа ступени $I_{>}$ с обратозависимой характеристикой может быть заблокирована пуском ступени $I_{>>}$. В этом случае время срабатывания определяются ступенью $I_{>>}$. Уставка ступени $I_{>>}$ может быть автоматически удвоена при броске тока, то есть при включении защищаемого объекта в сеть. Таким образом, у ступени $MTЗ I_{>>}$ может быть выбрана уставка по току меньше уровня броска тока при включении. Включение объекта определяется как ситуация, при которой фазный ток возрастает от значения менее $0,12 I_{>}$ до значения выше $1,5 I_{>}$ за время менее 60 мс. Считается, что пуск завершается, когда ток падет ниже $1,25 I_{>}$.

б) Защита от замыканий на землю.

Превышение током нулевой последовательности уставки тока срабатывания второй ступени $I_{0>}$ вызывает через выдержку 60 мс появление сигнала пуска защиты от замыканий на землю ступени. По истечении

установленного времени срабатывания при использовании характеристики с независимой выдержкой времени или вычисленного времени срабатывания при использовании характеристики с обратозависимой выдержкой времени ступень срабатывает.

Аналогично, первая ступень защиты от замыканий на землю $I_{0>>}$ вырабатывает сигнал пуска защиты через 40 мс после превышения током нулевой последовательности величины уставки. По истечении времени срабатывает.

Вторая ступень может иметь независимую или обратозависимую характеристику срабатывания. Доступны шесть групп обратозависимых характеристик. Работа обратозависимой характеристики ступени $I_{0>}$ может быть заблокирована пуском $I_{0>>}$. В этом случае время срабатывания определяется ступенью $I_{0>>}$.

в) Группы переключателей SGF, SGB и SGR.

Часть уставок и выбор характеристик срабатывания реле для различных целей задается группами переключателей SG.

Таблица 5.1 - Пример ручного подсчета контрольной суммы

| Номер переключателя | Состояние | Вес | Значение |
|---------------------|-----------|--------------------|----------|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 2 | 0 |
| 3 | 1 | 4 | 4 |
| 4 | 0 | 8 | 0 |
| 5 | 1 | 16 | 16 |
| 6 | 0 | 32 | 0 |
| 7 | 1 | 64 | 64 |
| 8 | 0 | 128 | 0 |
| Контрольная сумма | | $SG_{\Sigma} = 85$ | |

Переключатели реализованы программно и не являются физическими переключателями, встроенными в конструкцию реле. Проверка правильности выставления переключателей выполняется с помощью контрольной суммы. Таблица 5.1 иллюстрирует пример ручного подсчета контрольной суммы.

Если контрольная сумма, подсчитанная в соответствии с приведенным выше примером, равна считанной из реле контрольной сумме, то переключатели в рассматриваемой группе выставлены верно.

В таблице 5.2 приведены возможности адаптации функционала терминала защиты под заданные условия (уставки) при помощи переключателей.

Таблица 5.2 - Уставки переключателей

| Переключатель | Функция | Значение по умолчанию |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| SGF/1 | Установка самоподхвата выходного реле PO1 | 0 |
| SGF/2 | Установка самоподхвата выходного реле PO1 Когда переключатель в состоянии 0 и ток, вызвавший срабатывание, падает ниже уставки срабатывания, выходное реле возвращается в исходное состояние. Когда переключатель в состоянии 1 и ток, вызвавший срабатывание, падает ниже уставки срабатывания, выходное реле остается в сработавшем состоянии. Защелки выходных реле сбрасываются кнопкой на передней панели, подачей напряжения на дискретный вход или командой последовательного порта. | 0 |
| SGF1/3 | Минимальная длина импульса для сигнальных реле SO1 SO2. - 0 = 80 мс - 1 = 40 мс | 0 |
| SGF 1/4 | Минимальная длина импульса для отключающих реле PO1 и PO2. - 0 = 80 мс | 0 |

| | | |
|--|-------------------------|--|
| | - $t_1 = 40 \text{ мс}$ | |
|--|-------------------------|--|

Продолжение таблицы 5.2

| Переключатель | Функция | Значение по умолчанию |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| SGF 1/5 | УРОВ. Когда переключатель находится в состоянии 1, реле РО2 срабатывает через выдержку времени УРОВ после срабатывания реле РО1, если авария не ликвидировалась к этому моменту. Когда переключатель в положении 0, защита УРОВ | 0 |
| SGF 1/6 | Не используется | 0 |
| SGF 1/7 | Не используется | 0 |
| SGF 1/8 | Не используется | 0 |
| \sum SGF 1 | | 0 |
| SGF2/1 | Автоматическое удвоение ставки $I_{>>}$ при включении защищаемого объекта. Когда переключатель в положении 1, значение уставки автоматически удваивается при включении. | 0 |
| SGF 2/2 | Запрет срабатывания ступени с инверсной характеристикой $I_{>}$ при пуске ступени $I_{>>}$ Переключатель, установленный в состоянии 1, запрещает срабатывание ступени с инверсной характеристикой $I_{>}$ при пуске ступени $I_{>>}$. | 0 |
| SGF 2/3 | Запрет срабатывания ступени $I_{>>}$. Когда переключатель в положении 1, ступень $I_{>>}$ выведена из работы. | 0 |
| SGF 2/4 | Режим работы индикатора пуска ступени $I_{>}$. Когда переключатель в состоянии 0, индикатор пуска автоматически сбрасывается после устранения аварии. | 0 |
| SGF 2/5 | Режим работы индикатора пуска ступени $I_{>>}$. Когда переключатель в состоянии 0, индикатор пуска автоматически сбрасывается после устранения аварии. | 0 |
| SGF 2/6 | Не используется | 0 |

| | | |
|---------|-----------------|---|
| SGF 2/7 | Не используется | 0 |
| SGF 2/8 | Не используется | 0 |

Продолжение таблицы 5.2

| Переключатель | Функция | Значение по умолчанию |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Σ SGF 2 | | 0 |
| SGF3/1 | Автоматическое удвоение ставки $I_{0>>}$ при включении защищаемого объекта. Когда переключатель в положении 1, значение уставки автоматически удваивается при включении. | 0 |
| SGF 3/2 | Запрет срабатывания ступени с инверсной характеристикой $I_{0>}$ при пуске ступени $I_{0>>}$. Переключатель, установленный в состоянии 1, запрещает срабатывание ступени с обратозависимой выдержкой времени запрещено. | 0 |
| SGF 3/3 | Запрет срабатывания ступени $I_{0>>}$. Когда переключатель в положении 1, ступень $I_{0 >>}$ выведена из работы. | 0 |
| SGF 3/4 | Режим работы индикатора пуска ступени $I_{0>}$. Когда переключатель в состоянии 0, индикатор пуска автоматически сбрасывается после устранения аварии. | 0 |
| SGF 3/5 | Режим работы индикатора пуска ступени $I>>$. Когда переключатель в состоянии 0, индикатор пуска автоматически сбрасывается после устранения аварии. | 0 |
| SGF 3/6 | Не используется | 0 |
| SGF 3/7 | Не используется | 0 |
| SGF 3/8 | Не используется | 0 |
| Σ SGF 3 | | 0 |

- Реле ТЭМП-2501-1Х.

Установлено на присоединениях МВ-6Р, МВ-Р-6Р.

Функционал реле:

«- трехступенчатая ненаправленная МТЗ;

- одноступенчатая ненаправленная токовая защита от замыканий на землю;
- защита от несимметричного режима работы нагрузки;
- ускорение второй ступени МТЗ при включении выключателя;
- УРОВ с отдельным токовым органом;
- наличие двух групп уставок;
- местное управление выключателем;
- дистанционное управление выключателем;
- контроль цепей управления (РПО, РПВ);
- блокировка от многократных включений выключателя;
- одно и двухступенчатое АПВ, ЧАПВ;
- АВР секционного выключателя;
- отключение от внешних устройств;
- реализация алгоритмов автоматики различных присоединений;
- индикация токов, регистрация аварийных параметров;
- программируемое пользователем назначение дискретных входных цепей и выходных реле» [9].

Далее по тексту приводятся технические параметры и характеристики функций защит. Максимальная токовая защита (МТЗ).

Устройство содержит три ступени МТЗ;

- 1 ступень – отсечка;
- 2 ступень – с независимой от тока выдержкой времени;
- 3 ступень – как с зависимой, так и независимой выдержкой времени.

Ступени МТЗ выполнены как ненаправленные, в однофазном, двухфазном или трехфазном исполнении. Каждая из ступеней МТЗ (кроме 1 ступени) выполнена с несколькими выдержками времени. Предусмотрено две группы уставок (основные и вторичные) по току и времени, а также блокирование ступеней МТЗ внешними дискретными сигналами. Переключение между группами может проводиться по факту срабатывания дискретного входного сигнала (по выбору).

В состав устройства входит одна ступень МТЗ от однофазных замыканий на землю, как с независимой так и с зависимой от тока выдержкой времени. Ступень МТЗ от замыканий на землю выполнена как ненаправленная защита нулевой последовательности. Ток нулевой последовательности измеряется от трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП) или в нулевом проводе фазных трансформаторов тока. Предусмотрено две группы уставок (основные и вторичные) по току и времени, а также блокирование ступеней МТЗ внешними дискретными сигналами.

Переключение между группами может проводиться по факту срабатывания дискретного входного сигнала (по выбору).

- Реле ТЭМП-2501-2Х.

Установлено на присоединении ТН-6Р.

Функционал реле:

- двухступенчатая защита минимального напряжения.
- двухступенчатая защита от повышения напряжения.
- трехступенчатая защита от понижения линейных напряжений.
- двухступенчатая защита от замыканий на землю по напряжению нулевой последовательности.
- многофункциональное реле напряжения.
- наличие двух групп уставок.
- функция отключения ввода по АВР.
- блокировка ТСН.
- контроль напряжения секции.
- прием внешнего сигнала от защиты по напряжению обратной последовательности.
- вольтметровая блокировка МТЗ присоединений.
- индикация напряжений в первичных/вторичных величинах.
- встроенный аварийный осциллограф.
- регистрация аварийных параметров.

- календарь и часы реального времени.

Параметры и характеристики ступеней защит.

Устройство содержит две ступени защиты минимального напряжения ($3U_{<<}$ и $3U_{<}$), две ступени защиты от повышения напряжения ($3U_{>>}$ и $3U_{>}$), три ступени защиты от понижения линейных напряжений ($U_{<<<}$, $U_{<<}$, $U_{<}$) и две ступени защиты по максимальному напряжению нулевой последовательности ($U_{0>>}$ и $U_{0>}$). Каждая ступень защиты может быть независимо от остальных выведена/введена в действие. Все ступени имеют две группы уставок (основную и вторичную) по напряжению и времени срабатывания. Технические параметры и характеристики ступеней защит приведены в таблицах 5.3, 5.4, 5.5 и 5.6.

Таблица 5.3 - Двухступенчатая защита минимального напряжения

| Наименование параметра | 1 ступень ($3U_{<<}$) | 2 ступень ($3U_{<}$) |
|---------------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Номинальное входное напряжение защиты; В | 100; 110 | |
| Диапазон уставок по напряжению, U_n | от 0,1 до 1,2 | от 0,1 до 1,2 |
| Диапазон уставок по времени, с | от 0,05 до 10 | от 0,05 до 100 |
| Время возврата, не более, с | 0,04 | 0,04 |
| Коэффициент возврата, типовой | 1,05 | 1,05 |

Таблица 5.4 - Двухступенчатая защита от повышения напряжения

| Наименование параметра | 1 ступень ($3U_{<<}$) | 2 ступень ($3U_{<}$) |
|---------------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Номинальное входное напряжение защиты; В | 100; 110 | |
| Диапазон уставок по напряжению, U_n | от 0,1 до 1,2 | от 0,1 до 1,2 |
| Диапазон уставок по времени, с | от 0,05 до 10 | от 0,05 до 100 |
| Время возврата, не более, с | 0,04 | 0,04 |

| | | |
|-------------------------------|------|------|
| Коэффициент возврата, типовой | 0,95 | 0,95 |
|-------------------------------|------|------|

Таблица 5.5 - Трехступенчатая защита от понижения линейных напряжений

| Наименование параметра | 1 степень ($U \lll$) | 2 степень ($U \ll$) | 3 степень ($U <$) |
|------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| Номинальное входное напряжение защиты; В | 100; 110 | | |
| Диапазон уставок по напряжению, U_n | от 0,1 до 1,2 | от 0,1 до 1,2 | от 0,1 до 1,2 |
| Диапазон уставок по времени, с | от 0,05 до 10 | от 0,05 до 10 | от 0,05 до 10 |
| Время возврата, не более, с | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Коэффициент возврата, типовой | 1,05 | 1,05 | 1,05 |

Таблица 5.6 - Двухступенчатая защита от повышения напряжения

| Наименование параметра | 1 степень ($U_0 \gg$) | 2 степень ($U_0 >$) |
|------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Номинальное входное напряжение защиты; В | 100; 110 | |
| Диапазон уставок по напряжению, U_n | от 0,2 до 1,0 | от 0,2 до 1,0 |
| Диапазон уставок по времени, с | от 0,05 до 10 | от 0,05 до 10 |
| Время возврата, не более, с | 0,04 | 0,04 |
| Коэффициент возврата, типовой | 0,95 | 0,95 |

- Многофункциональное дифференциальное реле типа SPAD 346 С.

Реле установлено на присоединениях, питающих трансформаторы 6/0,4 кВ.

Функционал реле

Реле выполняет функции трехфазной дифференциальной токовой защиты, максимальной токовой защиты от замыканий на землю. Предназначено для защиты двухобмоточных силовых трансформаторов и блоков генераторов - трансформатор от коротких замыканий между обмотками, межвитковых замыканий, замыканий на землю и коротких замыканий на выводах, а также для защиты генераторов от замыканий между обмотками и коротких замыканий на выводах в зоне защиты.

Реле включает в себя три отдельных модуля: модуль трехфазной дифференциальной защиты с торможением SPCD-3D53, модуль защиты от замыканий на землю SPCD-2D55 и модуль максимальной токовой защиты (МТЗ) и защиты от замыканий на землю SPCJ-4D28. Значение номинальных токов – 1А и 5А. Стороны ВН и НН могут использовать один или различные номинальные токи.

Модуль трехфазной дифференциальной защиты с торможением SPCD 3D53. Модуль выполняет функцию защиты от коротких замыканий в обмотках. Дифференциальное реле сравнивает фазные токи на обеих сторонах защищаемого объекта. В случае, если дифференциальный ток фазных токов в одной из фаз превысит уставку характеристики срабатывания с торможением или ступень отсечки, модуль подает сигнал срабатывания.

Комбинированный модуль МТЗ и защиты от замыканий на землю SPCJ 4D28. Модуль предназначен для защиты одно, двух, трех фазных КЗ. Защита включает три ступени МТЗ: $I_{>}$, $I_{>>}$, $I_{>>>}$ и две ступени от замыканий на землю $I_{0>}$, $I_{0>>}$.

- Реле REJ 525. Комбинированное реле максимальной токовой защиты и защиты от замыкания на землю.

Функционал реле

Комбинированное реле максимальной токовой защиты (МТЗ) и защиты от замыканий на землю REJ 525 разработано для селективной защиты от междуфазных коротких замыканий и замыканий на землю в распределительных сетях среднего напряжения. Интегрированное реле

защиты включает в себя функцию трехфазной МТЗ и функцию защиты от замыканий на землю с возможностью действия на отключение и сигнализацию. Реле применяется в качестве одно-, двух- или трехфазной МТЗ и ненаправленной защиты от замыканий на землю.

Реле защиты REJ 525 выполнено на микропроцессорной элементной базе. Система самоконтроля постоянно отслеживает работу микропроцессора.

Реле имеет жидкокристаллический дисплей (ЖКД), который облегчает работу с реле и делает ее простой и надежной.

Дистанционный контроль реле может производиться или с переносного компьютера, подсоединенного к разъему на передней панели, или через разъем на обратной стороне, который позволяет подключаться к АСУ по последовательному каналу через оптоволоконную линию связи.

- Ступень трехфазной МТЗ (вторая ступень) с независимой или обратнозависимой характеристикой срабатывания.

- Ступень трехфазной МТЗ (первая ступень) без выдержки времени или с независимой выдержкой времени.

- Вторая ступень ненаправленной токовой защиты от замыканий на землю с независимой или обратнозависимой характеристикой срабатывания.

- Первая ступень ненаправленной токовой защиты от замыканий на землю без выдержки времени или с независимой выдержкой времени.

- Устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ).

- Регистратор аномальных режимов (осциллограф).

- Четыре калиброванных токовых входа.

- Гальванически изолированный дискретный вход.

- Все уставки могут быть изменены с помощью персонального компьютера. (Дополнительное бесплатное программное обеспечение.)

- Два отключающих выходных реле с нормально разомкнутыми контактами.

- Два сигнальных выходных реле с переключающими выходными контактами.
- Конфигурация выходных реле доступна для изменений.
- Оптический разъем связи с ПК (спереди) и разъем RS-485 (на обратной стороне) связи с АСУ.
- Постоянный самоконтроль оборудования и программного обеспечения. При устойчивой неисправности все ступени и выходные реле блокируются.
- Номинальная частота выбирается пользователем (50/60 Гц).
- MMI имеет алфавитно-цифровой ЖКД и кнопки управления.
- Назначаемый пользователем защитный пароль для MMI.
- Индикация токов в первичных величинах.

6 Расчет уставок релейной защиты

Уставки защит Фидера – 6ШР:

- коэффициент трансформации трансформатора тока $\eta_{ТТ}=1500/5$;
- коэффициент схемы $K_{сх.}=1$;
- МТЗ выполним на базе реле REJ-525.

Произведем расчет уставок защит Фидера – 6ШР:

- ток срабатывания защиты:

$$I_{с.з.} = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_{сум.пуск}$$

$$I_{с.з.} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 3620 = 5280 \text{ А}$$

где K_H - коэффициент нагрузки;

K_B - коэффициент возврата;

$I_{сум пуск}$ – суммарный пусковой ток, А .

- ток срабатывания реле:

$$I_{с.р.} = \frac{I_{сз} \cdot K_{сх}}{\eta_{ТТ}}$$

$$I_{с.р.} = \frac{5280 \cdot 1}{300} = 17,6 \text{ А}$$

где $K_{сх}$ – коэффициент схемы;

$\eta_{ТТ}$ - коэффициент трансформации трансформатора тока

$I_{сз}$ - ток срабатывания защиты, А.

Принимаем $I_{ср}=18\text{А}$

$I_{сз}=5400\text{А}$.

- расчет коэффициента чувствительности произведем:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз}}}{I_{\text{ср}}}$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{16330}{5400} = 3$$

где $I_{\text{кз}}$ – ток короткого замыкания;

$I_{\text{ср}}$ – ток срабатывания реле.

- Защиту от перегруза выполним на реле REJ-525.

- ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{з.}} = \frac{K_{\text{н}}}{K_{\text{в}}} \cdot I_{\text{н}}$$

$$I_{\text{з.}} = \frac{1,1}{0,95} \cdot 1125 = 1237 \text{ А,}$$

где $K_{\text{н}}$ - коэффициент нагрузки;

$K_{\text{в}}$ - коэффициент возврата;

$I_{\text{н}}$ – номинальный ток, А .

Ток срабатывания реле рассчитаем:

$$I_{\text{с.р.}} = \frac{I_{\text{сз}} \cdot K_{\text{сх}}}{\eta_{\text{ТТ}}}$$

$$I_{\text{с.р.}} = \frac{1237 \cdot 1}{300} = 4,1 \text{ А,}$$

где $K_{\text{сх}}$ – коэффициент схемы;

$\eta_{\text{ТТ}}$ - коэффициент трансформации трансформатора тока;

$I_{\text{сз}}$ - ток срабатывания защиты, А.

Уставки защит резервного ввода секции 6Р, принимается равным уставкам рабочего ввода.

МВ-Р-6Р МТЗ $I_3=5400\text{А}$ $I_p=13,5\text{А}$ $t=0.54$

Запуск АВР секции 6Р от защиты минимального напряжения осуществляется при падении напряжения на шинах сек 6Р до 25% от номинального.

$U_3=1500\text{В}$ $U_B= 25\text{В}$ $t=0, 5\text{сек}$

Отключение рабочего ввода секции 6Р при работе ЗМН возможно только при наличии на резервном фидере напряжения на шинах 85% от $U_{\text{ном}}$.

Групповая защита минимального напряжения секции 6Р работает при падении напряжения на шинах до 65% от $U_{\text{ном}}$.

$U_3=3900$ $1_{\text{гр}}$ $t=1_{\text{сек}}$ отключаемые механизмы указаны в таблице 6.1

$U_p=65$ $2_{\text{гр}}$ $t=12_{\text{сек}}$ нагрузок сек6Р.

Таблица 6.1 - Таблица нагрузок секции 6Р

| № Ячеек | Присоединение | I_n | $t_{\text{гр}}$ ЗМН | $I_{\text{номинал}}$ | $I_{\text{самозап}}$ |
|---------|---------------|---------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 7 | ЦН-6А | 40 | Не откл. | 40 | 200 |
| 8,10 | ДС-6Б | 84/100 | 1" на $I_{\text{ск}}$ | 84 | 420 |
| 9 | СН-6 | 71,5 | 12" | | |
| 12,14 | ДВ-6Б | 38,5/63 | 12" | 63 | 315 |
| 13 | ПЭН-6 | 450 | - | 450 | 2250 |
| 15 | Резерв | - | 1" на $I_{\text{ск}}$ | - | - |
| 16,18 | ДС-6А | 84/100 | - | 84 | 420 |
| 17 | Резерв | - | Не откл. | - | - |
| 19 | Т-6Н | 38,5/63 | - | 68,8 | 206 |
| 20,22 | ДВ-6А | 63 | 12" | 63 | 315 |

Продолжение таблицы 6.1

| № Ячеек | Присоединение | I_H | $t_{гр}$ ЗМН | $I_{номинал}$ | $I_{самозап}$ |
|---------|---------------|-------|--------------|---------------|---------------|
| 21 | ЦН-6Б | 40 | Не откл. | 40 | 200 |
| 23 | Резерв | - | - | - | - |
| 25 | Резерв | 40 | - | - | - |

Т-6Н

Паспортные данные:

ТС-750(мощность кВА)

$$U_H = 6300 / 400 (U_{ВН} / U_{НН})$$

$$I_H = 68,8 / 1085 (I_{НОМ. ВН} / I_{НОМ. НН})$$

Ток короткого замыкания за трансформатором Т-6Н:

$$I_{к.з.} = \frac{I_H \cdot 100}{U_K}$$

$$I_{к.з.} = \frac{100 \cdot 68,8}{7,85} = 876 \text{ А,}$$

где I_H - номинальный ток трансформатора на стороне ВН, А;

U_K – напряжение короткого замыкания трансформатора %.

Расчетным выбираем ток короткого замыкания за трансформатором Т-6Н как наибольший. МТО отстраивается от токов К.З. на стороне 0,4кВ приведенных к стороне 6кВ.

Ток срабатывания защиты МТО:

$$I_{сз} = K_H \cdot I_{к.з.}$$

$$I_{сз} = 1,4 \cdot 876 = 1226 \text{ А}$$

где K_H - коэффициент нагрузки;
 $I_{кз}$ – ток короткого замыкания, А .

Ток срабатывания реле:

$$I_{с.р.} = \frac{I_{сз} \cdot K_{сх}}{\eta_{ТТ}}$$
$$I_{с.р.} = \frac{1226 \cdot 1}{30} = 40,8 \text{ А}$$

где $K_{сх}$ – коэффициент схемы;
 $I_{сз}$ - ток срабатывания защиты, А;
Принимаем $I_p=40,8$, тогда $I_3=1226\text{А}$

МТЗ отстраивается от токов самозапуска секции 0,4кВ.

Из проектов $I_{сам}=172\text{А}$

Ток срабатывания защиты рассчитаем по формуле:

$$I_{с.з.} = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_{сам}$$
$$I_{с.з.} = \frac{1,2}{0,85} \cdot 172 = 242 \text{ А}$$

где K_H - коэффициент нагрузки;
 K_B - коэффициент возврата;
 $I_{сам}$ – ток самозапуска, А .

Ток срабатывания реле:

$$I_{с.р.} = \frac{I_{сз} \cdot K_{сх}}{\eta_{ТТ}}$$

$$I_{c.p.} = \frac{242 \cdot 1}{30} = 8 \text{ A}$$

$$t_{cp} = 0,5 \text{ сек}$$

где K_{cx} – коэффициент схемы;

$\eta_{тт}$ - коэффициент трансформации трансформатора тока;

$I_{сз}$ - ток срабатывания защиты, А.

МТЗ на сигнал отстраивается от номинального тока на стороне 6,3кВ.

Ток срабатывания защиты:

$$I_{с.з.} = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_H$$

$$I_{с.з.} = \frac{1,05}{0,85} \cdot 68,8 = 85 \text{ A}$$

где K_H - коэффициент нагрузки;

K_B - коэффициент возврата;

I_H – номинальный ток, А .

Ток срабатывания реле:

$$I_{c.p.} = \frac{I_{сз} \cdot K_{cx}}{\eta_{тт}}$$

$$I_{c.p.} = \frac{85 \cdot 1}{30} = 2,85 \text{ A}$$

$$t_{cp} = 9 \text{ сек}$$

где K_{cx} – коэффициент схемы;

$\eta_{тт}$ - коэффициент трансформации трансформатора тока ;

$I_{сз}$ - ток срабатывания защиты. А.

РЗЗ 6кВ принято $I_3=10\text{A}$

$I_p=0,1\text{A}$

РЗЗ 0,4кВ принято $I_p=4A$

$$I_3 = I_p \cdot \eta_{ТТ} = 4 \cdot 300 = 1200 \text{ A}$$

$$t=0.5_{\text{сек}}$$

В процессе проверок защит трансформаторов изменить существующие уставки на расчетные.

Сетевой насос - 6

$$P=630\text{кВт}$$

$$I=71.5A$$

$$K_{ТТ}=150/5$$

$$K_{сх}=1$$

Защита на реле REJ-525.

Расчет уставок срабатывания защиты МТО:

$$I_{3.} = I_n \cdot K_n \cdot K_p$$

$$I_{3.} = 71,5 \cdot 7 \cdot 2 = 1000A$$

где I_n -номинальный ток, А

K_n - коэффициент нагрузки

K_p - коэффициент пуска

Расчет уставки срабатывания реле защиты МТО произведем по формуле:

$$I_{с.р.} = \frac{I_{сз} \cdot K_{сх}}{\eta_{ТТ}}$$

$$I_{с.р.} = \frac{1000 \cdot 1}{30} = 33,3 \text{ A}$$

где I_3 – ток срабатывания защиты

$K_{сх}$ – коэффициент схемы

$\eta_{\text{ТТ}}$ - коэффициент трансформации трансформатора тока

Принимаем $I_p=33\text{А}$,

тогда $I_3=990\text{А}$.

Расчет уставки срабатывания защиты МТЗ произведем по формуле:

$$I_{\text{с.з.}} = \frac{K_H \cdot I_H}{K_B}$$

$$I_{\text{с.з.}} = \frac{1,2 \cdot 71,2}{0,8} = 107 \text{ А}$$

где I_H - номинальный ток, А

K_H - коэффициент нагрузки

K_B - коэффициент возврата

Расчет уставки срабатывания реле защиты МТЗ произведем по формуле:

$$I_{\text{с.р.}} = \frac{I_{\text{сз}} \cdot K_{\text{сх}}}{\eta_{\text{ТТ}}}$$

$$I_{\text{с.р.}} = \frac{107 \cdot 1}{30} = 3,57 \text{ А}$$

где I_3 – ток срабатывания защиты

$K_{\text{сх}}$ – коэффициент схемы

$\eta_{\text{ТТ}}$ - коэффициент трансформации трансформатора тока

Принимаем $I_{\text{с.р.}}=4\text{А}$, тогда $I_{\text{с.з.}}=120\text{А}$ $t=16_{\text{сек}}$

РЗЗ $I_3=10\text{А}$ $I_p=0,1\text{А}$.

Секция 6Н (0,4кВ) питается от секции 6Р.(6кВ) через трансформатор напряжения Т-6Н ячейка №7.

Багерный насос -2

$$P = 160 \text{ кВт}$$

$$U = 0.4 \text{ кВт}$$

$$I = 291 \text{ А}$$

Защита выполнена на электромагнитных элементах автоматов АВ-4А.

Расчет уставки срабатывания защиты МТО произведем по формуле:

$$I_{з.} = I_{н.} \cdot K_{н.} \cdot K_{п.}$$

$$I_{з.} = 291 \cdot 5 \cdot 2 = 2910 \text{ А}$$

где $I_{н.}$ - номинальный ток, А;

$K_{н.}$ - коэффициент нагрузки;

$K_{п.}$ - коэффициент пуска.

Расчет уставки срабатывания защиты МТЗ произведем по формуле:

$$I_{з.} = I_{н.} \cdot K_{н.}$$

$$I_{з.} = 291 \cdot 1,7 = 510 \text{ А}$$

$$t_{ср} = 9 \text{ сек}$$

где $I_{н.}$ - номинальный ток, А;

$K_{н.}$ - коэффициент нагрузки.

РЗЗ выполнена на реле ЭТ-521/2

$$I_{з.} = 25 \text{ А}$$

$$I_{п.} = 1 \text{ А.}$$

ПЭН – 6.

$$P = 3900 \text{ кВт}$$

$$U = 6000 \text{ В}$$

$$I_{н.} = 450 \text{ А}$$

$$\eta_{гт} = 600/5$$

$$K_{сх} = 1$$

Дифференциальная защита ПЭН – 6

Расчет уставок защиты произведем по формулам:

$$I_3 = K_H \cdot I_H$$

$$I_3 = 1,33 \cdot 450 = 600 \text{ А}$$

$$I_{cp} = \frac{I_3}{\eta_{ТТ}}$$

$$I_p = \frac{600}{200} = 3 \text{ А}$$

$$W = \frac{100}{I_p}$$

$$W = \frac{100}{3} = 33 \text{ витков}$$

где I_H - номинальный ток, А;

K_H - коэффициент нагрузки;

I_3 - ток срабатывания защиты;

$\eta_{ТТ}$ - коэффициент трансформации трансформатора тока;

I_p - ток срабатывания реле;

W - число витков уравнивающей обмотки диф защиты.

МТЗ ПЭН – 6

Ток срабатывания защиты рассчитаем по формуле:

$$I_{с.з.} = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_H$$

$$I_{с.з.} = \frac{2}{0,8} \cdot 450 = 1125 \text{ А}$$

где K_H - коэффициент нагрузки;

K_B - коэффициент возврата;

I_H – номинальный ток, А .

Ток срабатывания реле рассчитаем по формуле:

$$I_{с.р.} = \frac{I_{сз} \cdot K_{сх}}{\eta_{ТТ}}$$

$$I_{с.р.} = \frac{1100 \cdot 1}{120} = 9,2 \text{ А}$$

где $K_{сх}$ – коэффициент схемы;

$\eta_{тт}$ - коэффициент трансформации трансформатора тока ;

$I_{сз}$ - ток срабатывания защиты, А;

Принимаем $I_p = 10 \text{ А}$, тогда $I_з = 1200 \text{ А}$, $t = 16 \text{ с}$ ограничено зависима

Защита от замыканий на землю ПЭН – 6

РЗЗ $I_з = 10 \text{ А}$, $I_p = 0,1 \text{ А}$,

Технологические защиты ПЭН – 6 (действуют на отключение при условии превышения времени):

- 5с- время работы маслососа;
- 2с- ограничение времени при отсутствии давления масла;
- 30с- ввод в работу защиты при нагнетании давления в напорном патрубке ПЭН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной бакалаврской работе проанализировано оборудование секции 6Р и сделан вывод о необходимости его замены. Произведен расчет токов короткого замыкания и выбор уставок РЗА.

В классе напряжения 10кВ наиболее технологичным является вакуумный тип выключателей, т.к. при данном принципе гашения дуги достигается наибольший ток отключения по сравнению с другими выключателями. Вакуумные выключатели просты и надежны по конструкции, обладают высоким коммутационным ресурсом. Произведен сравнительный анализ ряда ведущих производителей вакуумных выключателей, в результате выбраны наиболее надежные по конструкции и ресурсу выключатели ВВ-TEL. Также Приняты к установке микропроцессорные терминалы защит взамен устаревшей электромеханической релейной защиты.

Таким образом, за счет замены изношенного оборудования удалось повысить надёжность электроснабжения потребителей секции 6Р, снизить потенциальный ущерб при аварийных режимах за счёт применения надежных и быстродействующих микропроцессорных терминалов РЗА и современных вакуумных выключателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), 7-е издание, перераб. и доп., с изменениями. М.: Министерство энергетики РФ, 2003 г.
2. ГОСТ 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления [Электронный ресурс]. Введ. 28.04.2008. Москва: Стандартинформ, 2008. 22 с. Режим доступа: URL: <http://www.library.fa.ru/files/gost-ssylka.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).
3. ГОСТ 7.82-2001. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов. Общие требования и правила составления [Текст]. Введ. 01.07.2002. Москва: Изд-во стандартов, 2001. 23 с.
4. ГОСТ 7.1-2003. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления [Текст] : взамен ГОСТ 7.1-84. – Введ. 01.07.2004. Москва: Изд-во стандартов, 2004. 64 с.
5. ГОСТ Р 7.0.12-2011. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на русском языке. Общие требования и правила. [Электронный ресурс]. Введ. 13.12.2011. Москва: Стандартинформ, 2012. 27 с. Режим доступа: URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4293793/4293793458.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).
6. ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления [Электронный ресурс] : взамен ГОСТ 7.32-2001. Введ. 01.07.2018. Москва: Стандартинформ, 2017. 32 с. Режим доступа: URL: <http://files.stroyinf.ru/Data/655/65555.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).

7. Анчарова Т. В., Рашевская М. А., Стебунова Е. Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: учебное пособие. М.: Форум, 2014. 416 с.

8. Богданов А. В., Бондарев А. В. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматизации в электроэнергетических системах [Электронный ресурс] : учеб. пособие. Оренбург : ОГУ, 2016. 82 с. : ил. Электронно-библиотечная система "IPRbooks". - ISBN 8-987-903550-43-2 (дата обращения: 23.04.2019).

9. Булычев А. В., Наволочный А. А. Релейная защита в распределительных электрических сетях [Электронный ресурс] : пособие для практ. расчетов. Москва : ЭНАС, 2017. 206 с. : ил. Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/76939.html>. Электронно-библиотечная система "IPRbooks". ISBN 978-5-4248-0006-1 (дата обращения: 23.04.2019).

10. Вахнина В. В., Черненко А. Н. Проектирование систем электроснабжения [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. пособие; ТГУ ; Ин-т энергетики и электротехники ; каф. "Электроснабжение и электротехника". ТГУ. Тольятти : ТГУ, 2016. 78 с. : ил. - Библиогр.: с. 76-78. - Репозиторий ТГУ. ISBN 978-5-8259-0929-5 (дата обращения: 23.04.2019).

11. Вахнина В. В., Черненко А. Н. Системы электроснабжения [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. пособие; ТГУ ; Ин-т энергетики и электротехники ; каф. "Электроснабжение и электротехника". Тольятти : ТГУ, 2015. 46 с. : ил. Библиогр.: с. 35. Репозиторий ТГУ. ISBN 978-5-8259-0915-8 (дата обращения: 23.04.2019).

12. Гуревич В. И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса [Электронный ресурс] : учеб.-практ. пособие. Москва : Инфра-Инженерия, 2016. 128 с. Электронно-библиотечная система "IPRbooks". - ISBN 978-5-9729-0104-3 (дата обращения: 23.04.2019).

13. Дубинский Г. Н., Левин Л. Г. Наладка устройств электроснабжения выше 1000 В [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] Изд. 2-е, перераб. и доп.

- Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2015. 538 с. Электронно-библиотечная система "ZNANIUM.COM". ISBN 978-5-91359-140-1 (дата обращения: 23.04.2019).

14. Красник В. В. Эксплуатация электрических подстанций и распределительных устройств [Электронный ресурс] : произв.-практ. пособие. Москва : ЭНАС, 2016. 319 с. : ил. Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/76954.html>. Электронно-библиотечная система "IPRbooks". - ISBN 978-5-4248-0005-4 (дата обращения: 23.04.2019).

15. Матаев У. М., Абдурахманов А. А., Алиев Б. А. Короткие замыкания и защита линий 0,4-35 кВУ [Электронный ресурс] : учеб. пособие. Ч. 2. Монтаж и наладка электрооборудования электрических станций, подстанций и линий электропередач. Алматы : Нур-Принт, 2015. - 185 с. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67069.html>. Электронно-библиотечная система "IPRbooks" (дата обращения: 23.04.2019).

16. Немировский А. Е., Сергиевская И. Ю., Крепышева Л. Ю. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций [Электронный ресурс] : учеб. пособие. 2-е изд. Москва : Инфра-Инженерия, 2018. - 148 с. : ил. - Электронно-библиотечная система "IPRbooks". ISBN 978-5-9729-0207-1 (дата обращения: 23.04.2019).

17. Соловьев А. Л., Шабад М. А. Релейная защита городских электрических сетей 6 и 10 кВ [Электронный ресурс] : учебное пособие / под ред. А. В. Беяева. Санкт-Петербург : Политехника, 2016. 175 с. : ил. Электронно-библиотечная система "IPRbooks". ISBN 978-5-7325-1100-0 (дата обращения: 23.04.2019).

18. Схемы АПВ в электрических сетях : использование емкостного отбора напряжения [Электронный ресурс] : практ. пособие / сост. Е. Г. Дорохин [и др.] ; под ред. Б. А. Алексеева. Москва : ЭНАС, 2017. 77 с. : ил. Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/76204.html>. Электронно-библиотечная система "IPRbooks". ISBN 978-5-4248-0126-6 (дата обращения: 23.04.2019).

20. IEC/TR 61000-1-3 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 1–3: General - The effects of high-altitude EPM (HEMP) on civil equipment and systems.

21. Rakov V., Uman M. “Lightning”, Cambridge, 2005.

22. Csanyi E. Learn HV substation elements (graphic symbols, basics & connection schemes) [Электронный ресурс] : Electrical Engineering Portal. 2019. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/hv-substation-elements> (дата обращения: 15.04.2019).

23. Miodrag K. Learn to read and understand single line diagrams and wiring diagrams [Электронный ресурс] : Electrical Engineering Portal. 2019. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/read-understand-single-line-wiring-diagrams> (дата обращения: 12.04.2019).

24. Song X., Xiaoxing Z., Ju T. A review on SF6 substitute gases and research status of CF3 I gases // Energy Reports. 2018. № 4. P. 486-496.