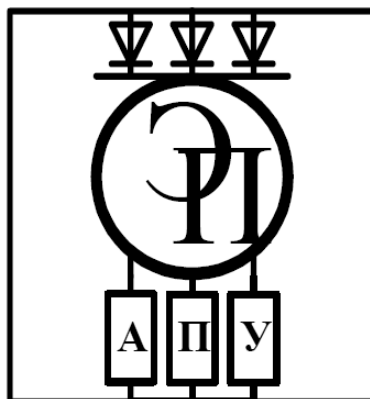


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

# ЭЛЕКТРООБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальностей 1-53 01 05 «Автоматизированные  
электроприводы» и 6-05-0713-04 «Автоматизация  
технологических процессов и производств»  
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2024

УДК 681.52  
ББК 31.291  
Э22

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «31» августа 2023 г., протокол № 1

Составитель канд. техн. наук, доц. Г. С. Леневский

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Методические рекомендации предназначены к лабораторным работам для студентов специальностей 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» и 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств» дневной и заочной форм обучения.

В методических рекомендациях изложены содержание, цель, задачи и контрольные вопросы по лабораторным работам, даны рекомендации для самостоятельной подготовки при выполнении отдельных типовых задач, приведены требования по составу и оформлению отчёта.

Учебное издание

## ЭЛЕКТРООБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 81 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2024

## Содержание

Перечень условных сокращений .....	4
Введение .....	5
1 Лабораторная работа № 1. Распределительные устройства .....	6
2 Лабораторная работа № 2. Комплексная трансформаторная подстанция .....	8
3 Лабораторная работа № 3. Компенсация реактивных нагрузок .....	13
4 Лабораторная работа № 4. Измерение и учёт активной и реактивной мощности.....	17
5 Лабораторная работа № 5. АПВ и АВР в сетях электрообеспечения промышленных установок.....	22
6 Лабораторная работа № 6. Распределение напряжения по гирлянде подвесных изоляторов .....	26
7 Лабораторная работа № 7. Профилактические испытания изоляции высоковольтного трансформатора .....	31
8 Лабораторная работа № 8. Изучение релейной защиты в системах электрообеспечения промышленных предприятий .....	35
Список литературы .....	40

## Перечень условных сокращений

- АЭП – автоматизированный электропривод.  
АПВ – автоматическое повторное включение.  
АВР – автоматическое включение резерва.  
ВЛЭП – высоковольтная линия электропередачи.  
ВН – высокое напряжение.  
ВПи – ведомость покупных изделий.  
ВП – ведомость проекта.  
ВС – ведомость спецификаций.  
ГПП – главная понизительная подстанция.  
ДП – дипломный проект.  
ИРМ – источник реактивной мощности.  
ИФЗО – инженерный факультет заочного обучения.  
КД – конструкторская документация.  
КЗ – короткое замыкание.  
ККД – комплект конструкторской документации.  
КМ – конденсаторы масляные.  
КС – конденсаторы соволовые.  
ЛР – лабораторная работа.  
МР – методические рекомендации.  
НН – низкое напряжение.  
ПЗ – пояснительная записка.  
ПО – программное обеспечение.  
ПЭЭ – приемник электрической энергии.  
СБ – сборочный чертеж.  
СД – синхронные двигатели.  
СК – синхронные компенсаторы.  
СЛ – стенд лабораторный.  
СУ – система управления.  
СЭП – схема электрическая принципиальная.  
СЭС – схема электрическая соединений.  
СЭФ – схема электрическая функциональная.  
ТД – текстовые документы.  
ТП – трансформаторная подстанция.  
ТС – таблица соединений.  
ТХ – технические характеристики.  
ТУ – технические условия.  
УГО – условное графическое обозначение.  
УКРМ – установка компенсации реактивной мощности.  
ХХ – холостой ход.  
ЦРП – центральная распределительная подстанция.  
ЭП и АПУ – электропривод и автоматизация промышленных установок.  
ЭО – электрооборудование.

## Введение

Электрообеспечение – система электроснабжения, предназначенная для преобразования, регулирования, распределения электрической энергии и обеспечения бесперебойной подачи различных напряжений постоянного и переменного тока потребителями электрической энергии, которые, в свою очередь, представляют совокупность приёмников электрической энергии.

Надёжное снабжение электрической энергией потребителей электрической энергии требуемого качества – необходимое условие нормальной работы любого промышленного предприятия, предприятий сельского хозяйства, жилищно-коммунальных хозяйств, учреждений образования и культуры, медицинских учреждений и т. д.

Важной частью подготовки инженеров-электриков является выполнение лабораторных работ по учебной дисциплине «Электрообеспечение промышленных и транспортных установок». В данных МР представлены основные сведения для выполнения ЛР.

## 1 Лабораторная работа № 1. Распределительные устройства

### Цель и задачи выполнения работы.

- 1 Изучить назначение конструкции, электрической схемы распределительных устройств (РУ) напряжением до 1000 и св. 1000 В.
- 2 Практически оценить работу защит КСО-272.

### *Краткие теоретические сведения*

*Закрытые распределительные устройства.* РУ напряжением до 10 кВ и токи до 3000 А широко распространены на промышленных и городских подстанциях, главных РУ электростанций средней и малой мощности, РУ собственных нужд мощных электростанций. РУ различных конструкций изготавливают на предприятиях электропромышленности и электромонтажных организаций в виде камер «Камера сборная односторонняя» (КСО) или шкафов «Комплектное распределительное устройство» (КРУ).

КСО и КРУ изготавливают различных серий с разнообразными схемами первичных и вторичных цепей. Наличие шкафов с разнообразными схемами первичных цепей позволяет комплектовать их согласно принятой схеме электрических соединений установки.

Классификация комплектных электротехнических устройств:

- по назначению: комплектные распределительные устройства, комплектные трансформаторные подстанции (КТП);
- по условиям окружающей среды: внутренней установки, наружной установки;
- по климатическим условиям: для умеренного климата, тропического исполнения и холодостойкого исполнения;
- по конструктивному исполнению: выдвижного (выкатного) типа, стационарные;
- по типу основного коммутационного аппарата: с маломасляными выключателями; с электромагнитными выключателями;
- по условиям обслуживания: одностороннего обслуживания, двустороннего обслуживания (на определенном расстоянии от стены);
- по защищенности токоведущих частей: защищенного исполнения, открытого исполнения;
- по конструкции линейного вывода: с кабельными, с воздушными выводами;
- по роду оперативного тока: на постоянном токе, на переменном токе;
- по условиям эксплуатации: водобрызгозащитные, герметичные и взрывозащитные.

Кроме того, комплектные устройства подразделяются: по номинальному напряжению, номинальному току, типу выключателя и привода к нему, по схемам главных и вспомогательных соединений и другим показателям.

Комплектные устройства, по сравнению с обычными конструкциями электротехнических установок, обладают следующими основными преимуществами: значительно уменьшаются объёмы строительного-монтажных работ и сокращаются сроки их выполнения; достигается большая экономия затрат; улучшается качество электроустановок, увеличивается надёжность и безопасность их обслуживания и сокращаются эксплуатационные расходы; обеспечиваются удобство и быстрота при расширении или реконструкции; упрощается комплектация и снабжение при производстве строительного-монтажных работ; сокращаются объёмы и сроки проектирования.

Применение комплектных устройств является основой новой индустриализации строительного-монтажных работ при сооружении электрических станций, трансформаторных подстанций и электроустановок промышленных предприятий.

Камеры вводов и отходящих линий рассчитаны на ток 400, 630 и 1000 А. Они комплектуются выключателями типа ВМГ-10, ВЭМ-10Э с приводами П11-67 и ПЭ-П. В камерах КСО-272 можно взамен выключателей устанавливать выключатели нагрузки ВМПз-16 и ВМПз-17 с заземляющими ножками, исключающие при эксплуатации ошибочные операции.

### **Задание**

1 Изготовить техническую характеристику, схему управления, устройство и принцип работы камеры КСО-272.

2 Ознакомиться с основными техническими данными шкафов системы КРУ с маломасляными и электромагнитными выключателями.

3 Ознакомиться с некоторыми данными высоковольтных выключателей на 6...10 кВ.

4 Изучить назначение, конструкцию, электрическую схему и элементы РУ напряжением до 1000 В.

5 Получить практические навыки по управлению и работе защиты камеры КСО-272.

6 Анализ материала. Составление отчёта по всей программе.

### **Перечень используемого оборудования.**

Стенд для испытаний камеры КСО-272.

### **Порядок проведения работы.**

1 Изготовить техническую характеристику, схему управления, устройство и принцип работы камеры КСО-272.

2 Ознакомиться с основными техническими данными шкафов системы КРУ с маломасляными и электромагнитными выключателями.

3 Ознакомиться с некоторыми данными высоковольтных выключателей на 6...10 кВ.

**Содержание отчета.**

- 1 Цель работы.
- 2 Технические данные камеры КСО-272:
  - а) номенклатура КСО-272;
  - б) назначение;
  - в) номинальные параметры;
  - г) составные части и узлы;
  - д) схема принципиальная КСО-272.
- 3 Выводы.

***Контрольные вопросы***

- 1 Основные термины и определения, расшифровка сокращений и понятий.
- 2 Классификация КРУ.
- 3 Схемы главных понизительных подстанций.
- 4 Схемы цеховых подстанций.
- 5 Принцип работы короткозамыкателя и отделителя. Недостатки и преимущества.
- 6 Состав и функции распределительных устройств.
- 7 Принцип работы секционных выключателей. Недостатки и преимущества.
- 8 Радиальные схемы электроснабжения. Недостатки и преимущества.
- 9 Магистральные схемы электроснабжения. Недостатки и преимущества.
- 10 Трансформаторы. Двухтрансформаторные и многотрансформаторные подстанции. Области применения.

**2 Лабораторная работа № 2. Комплексная трансформаторная подстанция****Цель и задачи выполнения работы.**

- 1 Изучить назначение, конструкцию КТП-250/10/0,4-81-У1, в том числе электрическую схему.
- 2 Усвоить практические приёмы в обслуживании комплексных трансформаторных подстанций (КТП).

***Краткие теоретические сведения***

Распределительное устройство представляет собой совокупность соединённых между собой электрических аппаратов, предназначенных для приёма и распределения электрической энергии. В функции РУ входит защита сети и обслуживающих её электрических аппаратов от КЗ и ненормальных режимов. Различают сборные и комплектные РУ. Сборные РУ на напряжение 6...35 кВ монтируются в специально построенных кирпичных или железобетонных капи-



тальных зданиях. Масляные выключатели монтируются в железобетонных ячейках, рассчитанных на возможность взрыва.

Сборные РУ на напряжение выше 35 кВ строятся открытого типа (ОРУ) и не требуют строительства капитальных зданий. Отдельные электрические аппараты поступают с заводов, монтируются и налаживаются на месте установки. Значительного улучшения технических, эксплуатационных и экономических характеристик можно достигнуть применением КРУ. Все входящие в КРУ электрические аппараты (коммутационные аппараты, измерительные трансформаторы, аппараты управления, устройства релейной защиты и автоматики и т. п.) монтируются заводом-изготовителем вместе со всеми электрическими соединениями на общем металлическом основании.

Различают КРУ, предназначенные для работы в закрытом помещении и для наружной установки на открытом воздухе (КРУН). В конструкции КРУН предусматривается защита электрических аппаратов и всех электрических соединений от воздействия окружающей среды (дождя, снега, тумана, пыли, ветра).

По сравнению со сборными КРУ имеются следующие преимущества.

1 Значительно уменьшается трудоёмкость проектирования и строительно-монтажных работ.

2 Улучшается качество электроустановок, увеличивается надёжность их работы, безопасность обслуживания и сокращаются эксплуатационные расходы.

3 Обеспечивается возможность модернизации и реконструкции.

4 Изготовление КРУ ведётся индустриальным методом с широким применением механизированного труда. Технологические операции разбиваются на простейшие, что позволяет автоматизировать изготовление и контроль качества.

С целью уменьшения размеров, улучшения эксплуатационных характеристик и повышения надёжности к электрическим аппаратам КРУ предъявляются следующие требования.

1 Выключатели должны обладать малыми габаритами и встроенным приводом, высокой износостойкостью, пожаро- и взрывобезопасностью. Они должны снабжаться розеточными или пальцевыми контактами. С учетом этих требований в КРУ применяются маломасляные, электромагнитные, элегазовые и вакуумные выключатели.

2 Трансформаторы тока и напряжения применяются с литой изоляцией, обладающей высокой электрической и механической прочностью. Такие трансформаторы не требуют ухода в эксплуатации.

3 Разъединители должны быть механически связаны с выключателем и обеспечивать электробезопасность при выкатывании выключателя, смонтированного на тележке. Монтаж выключателя с приводом на выкатных тележках позволяет легко производить ревизию и профилактические работы. Подвижные контакты разъединителя выполняются в виде розетки или пальцевых контактов, устанавливаемых на выводах выключателя. Неподвижные контакты в виде штыря или шины крепятся на специальных опорных изоляторах. При выкатывании тележки из КРУ контакты разъединителя размыкаются, а на концы выходного силового кабеля накладывается заземление с помощью заземлителя,

привод которого заблокирован с механизмом тележки выключателя. При вкатывании тележки пальцы подвижных контактов разъединителя охватывают неподвижные и создают надёжный контакт. Эта конструкция обеспечивает пропускание номинальных токов до 3000 А.

4 Разрядники и предохранители должны иметь малые габаритные размеры и требовать минимального ухода в эксплуатации. Для защиты от перенапряжений используются вентильные разрядники типов РВО, РВРД. Предохранители устанавливаются для защиты КРУ от повреждений в измерительных трансформаторах напряжения (ТН) и трансформаторах собственных нужд, которые питаются ПКТП и ПК.

### **Задание**

- 1 Ознакомиться с устройством КТП, записать паспортные данные.
- 2 Ознакомиться с электрической схемой КТП.
- 3 Проверить работу КТП при перегрузках и однофазном коротком замыкании нулевого провода фидеров 1...3.
- 4 Проверить работу автоматического включения/подключения фидера уличного освещения.
- 5 Ознакомиться с работой блокировочных устройств КТП.
- 6 Анализ информационного материала. Составление отчёта.

### **Перечень используемого оборудования.**

Стенд для испытаний камеры КТП-250/10/0,4-81-У1. Схема изображена на рисунке 2.1. На рисунке приняты следующие обозначения: ВВ – счётчик; ЕЛ – лампа; F1...F6 – предохранители; FV1...FV6 – разрядники; КА1...КА3 – реле токовое; КЛ – реле промежуточное; КМ – пускатель магнитный; КС – фотореле; КСТ – реле тепловое; Q – разъединитель; R1...R5 – резисторы; S – рубильник; SA1...SA2 – переключатели; SAB – выключатель блокировки; SN – переключатель; SF1...SF4 – выключатели автоматические; Т – трансформатор силовой; ТА1...ТА5 – трансформатор тока; X – розетка штепсельная.

### **Принцип работы.**

Для защиты оборудования КТП от атмосферных перенапряжений на стороне 10 и 0,4 кВ установлены вентильные разрядники FV1...FV6 типа ПК-10/50, от перегрузки – реле тепловое КСТ.

Защита от перегрузки срабатывает не более чем через 80 мин при токе, равном 1,45 номинального тока силового трансформатора. При этом с помощью автоматических выключателей SF1...SF3 открываются фидеры 1...3, а фидер 4 остаётся в работе.

В SF1...SF4 встроены тепловые и электромагнитные расцепители. Для защиты от однофазных коротких замыканий в нулевых приводах фидеров 1–3 установлены токовые реле КА1...КА3. Защита от однофазных коротких замыканий обеспечивает отключение SF1...SF3 при токе однофазных коротких замыканий, равном 90 %...100 % номинального тока расцепителя. Защита фидера уличного освещения, цепей внутреннего освещения подстанции и цепей обогрева счётчика выполняется предохранителями F1...F6. Для автома-

тического включения и отключения фидера уличного освещения предусмотрено фотореле KS типа ФР-2. Ручное управление осуществляется переключателем SA2.

Учёт расхода активной энергии выполняется счётчиком СА 4У-4672М.

Контроль наличия напряжения и освещения распределительного устройства со стороны НН осуществляется лампой EL.

### **Порядок проведения работы.**

Движок регулятора тока R1 установить в крайнее левое положение. Включить стенд от распределительного пункта ПР247. Выключатель QF1 поставить в положение 1. Амперметр PA1 покажет ток 4...5 А. Реостатом R1 движением вправо плавно поднять ток до 7 А. Защита сработает приблизительно через 5 мин. В распределительном устройстве низшего напряжения КТП произойдёт отключение фидеров 1...3. На стенде будут слышны характерные щелчки срабатывания автоматов и погаснет лампа.

*Исследование КТП при однофазном КЗ в нулевом проводе фидеров 1...3.*

Включить автоматы SF1...SF3. Установить переключатель QF1 в положение 2. Должны загореться лампы HL1...HL3. Пакетный переключатель S1 ставится в положение ВКЛ. Имитируется КЗ между фазой и нулевым проводом. Показать стрелкой. Срабатывает автомат фидера 1, гаснет лампа HL1. Аналогичные действия переключателей SF2, SF3 вызовут срабатывание фидеров 2 и 3. Погаснут, соответственно, лампы HL2 и HL3.

*Работа фидера уличного освещения.*

Переключатель SN (см. рисунок 2.1) ставится в положение «авт». На стенде задвинуть шторку перед «глазком» фотореле. Сразу же сработает фотореле KS, контакты которого подадут питание на пускатель магнитный KM. На стенде загорится лампа HL4. Таким образом, фидер включён.

Отключение фидера произойдёт после открытия «глазка» фотореле.

Контроль наличия напряжения в РУ низшего напряжения КТП осуществляется лампой HL5 и переключателем QF2.

*Работа блокировочного устройства.*

Для отключения рубильника низшего напряжения S (см. рисунок 2.1) требуется открыть дверь РУ низшего напряжения КТП. Механически с дверью соединён концевик включателя блокировки SA3, который при открытой двери приводит к отключению фидеров 1...4, что исключает выключение рубильника под нагрузкой со стороны низшего напряжения.

### **Содержание отчета.**

1 Цель работы.

2 Технические данные КТП:

- а) номенклатура КТП;
- б) назначение;
- в) номинальные параметры;
- г) составные части и узлы;
- д) схема принципиальная КТП.

3 Выводы.

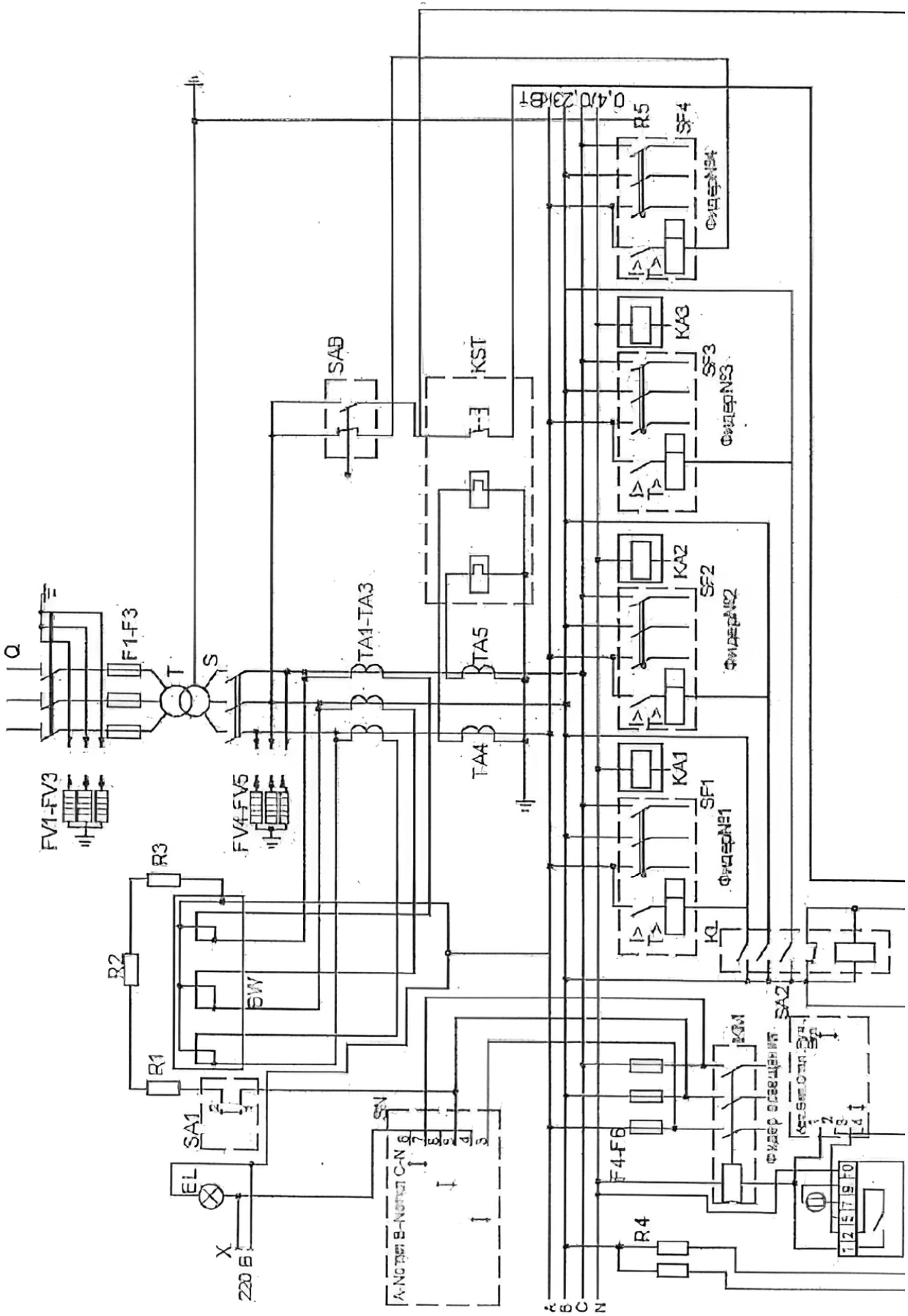


Рисунок 2.1 – Схема электрическая принципиальная

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Схемы соединения обмоток трансформаторы, их преимущества и недостатки.
- 2 Режимы работы нейтрали сети.
- 3 Основные узлы КТП и их назначение.
- 4 Узлы КТП. Принцип работы.
- 5 Основные блокировки и защиты КТП.
- 6 Основные функции КТП.
- 7 Основные термины и определения, расшифровка сокращений и понятий.
- 8 Принцип работы КТП.
- 9 Особенности работы КТП с глухозаземлённой нейтралью.
- 10 Особенности работы КТП с изолированной нейтралью.

## **3 Лабораторная работа № 3. Компенсация реактивных нагрузок**

### **Цель и задачи выполнения работы.**

- 1 Изучить основные положения природы реактивной нагрузки и мероприятия по её компенсации.
- 2 Получить практические навыки по компенсации реактивной мощности (РМ) в автоматическом и ручном режимах.

### ***Краткие теоретические сведения***

Одним из основных вопросов, решаемых как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации систем промышленного электроснабжения, является вопрос о компенсации реактивной мощности, включающий выбор целесообразных источников, расчёт и регулирование их мощности, размещение источников в системе электроснабжения.

В настоящее время прирост потребления РМ существенно превосходит прирост потребления активной мощности. При этом передача РМ на значительные расстояния от мест генерации до мест потребления существенно ухудшает технико-экономические показатели систем электроснабжения.

Все большую долю в общем объёме суммарных нагрузок занимают резкопеременные и нелинейные нагрузки с повышенным потреблением РМ (их доля достигает 40 %) – это вентиляльные преобразователи для электроприводов постоянного и переменного тока, сварочные и термические установки и т. д. Достаточно сказать, что суммарная установленная мощность устройств, компенсирующая резкопеременность, несимметрию и несудальность формы кривой тока может быть соизмерима с мощностью нагрузки, а их габариты и удельные показатели стоимости могут превосходить соответствующие показатели нагрузки.

Пусть приёмник электроэнергии присоединён к источнику синусоидально-

го напряжения  $u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t)$  и потребляет синусоидальный ток  $i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$ , сдвинутый по фазе относительно напряжения на угол  $\varphi$ . Мгновенная мощность является суммой двух величин, одна из которых постоянна во времени, а другая пульсирует с двойной частотой:

$$s = u \cdot i = U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot I \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi). \quad (3.1)$$

Полную мощность на зажимах приемника в комплексной форме можно записать как

$$S = \dot{U} \cdot \dot{I} = U \cdot I \cdot e^{j\varphi} = U \cdot I \cdot \cos \varphi + j \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = P + j \cdot Q, \quad (3.2)$$

где  $\dot{U}$  – комплекс напряжения;

$\dot{I}$  – сопряженный комплекс тока;

$Q$  – реактивная мощность.

Первое слагаемое (3.2) – активная мощность; характеризует энергию, выделяемую в единицу времени на производство полезной работы. Второе слагаемое (3.2) за время  $T$  равно нулю – это РМ, т. е. на ее создание не требуется каких-либо материальных затрат и поэтому она не совершает полезной работы.

С точки зрения генерации и потребления между реактивной и активной мощностью существуют значительные различия. Если большая часть активной мощности потребляется приемниками и лишь незначительная теряется в элементах сети и электрооборудования, то потери РМ в элементах сети могут быть соизмеримы с РМ, потребляемой приемниками электроэнергии. Активная мощность генерируется электростанциями, а реактивная – циркулирует между потребителем и генераторами электростанций, синхронными компенсаторами, синхронными двигателями, батареями конденсаторов, тиристорными источниками реактивной мощности и линиями.

Концентрация производства РМ во многих случаях экономически нецелесообразна по следующим причинам.

1 При передаче значительной РМ возникают дополнительные потери активной мощности и электроэнергии во всех элементах системы электропитания, обусловленные загрузкой их РМ. Так, при передаче активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностей через элемент системы электропитания с сопротивлением  $R$  потери активной мощности составят:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R = \frac{P^2}{U^2} \cdot R + \frac{Q^2}{U^2} \cdot R = \Delta P_a + \Delta Q_p = \frac{P_a^2}{\cos^2(\varphi^2 \cdot u^2)}, \quad (3.3)$$

где  $\Delta Q_p$  – составляющая потерь активной мощности от передачи реактивной.

2 Увеличиваются сечения проводов и кабелей, что удорожает стоимость установки. Так, снижение  $\cos \varphi$  от 1 до 0,8 при неизменной активной мощности

ведет к росту потерь в  $1 / 0,8^2 = 1,56$  раза, что требует увеличения веса токоведущих частей до 25 % или числа трансформаторов (подстанций).

3 Ограничивается возможный предел передачи активной мощности, т. к. при  $\cos\varphi < 1$  все элементы системы загружаются РМ.

4 Неиспользуется мощность первичных двигателей и генераторов.

5 Увеличиваются потери и колебания напряжения в линии, которые особенно существенны в сетях расточного значения. Например, при передаче мощностей  $P$  и  $Q$  через элементы системы с активным сопротивлением  $R$  и реактивным  $X$  потери напряжения составят

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} = \frac{P \cdot R}{U} + \frac{Q \cdot X}{U} \cdot R = \Delta U_a + \Delta U_p, \quad (3.4)$$

где  $U_p$  – потери напряжения, обусловленные РМ.

6 Вследствие изменения величины РМ в течение суток возникают отклонения напряжения, которые вызывают дополнительный экономический ущерб у потребителя.

Основными потребителями РМ на промышленных предприятиях являются асинхронные двигатели (60 %...65 % общего потребления), трансформаторы (20 %...25 %), вентильные преобразователи, реакторы, воздушные электрические сети и прочие приёмники (10 %). Из (3.2) следует, что

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad \frac{Q}{P} = \operatorname{tg}\varphi; \quad \frac{P}{S} = \cos\varphi. \quad (3.5)$$

До недавнего времени основным нормативным показателем, характеризующим РМ, был  $\cos\varphi$ . На вводах, питающих промышленные предприятия, нормируется  $\cos\varphi = 0,92...0,95$ . Однако выбор соотношения  $P/S$  в качестве нормативного не даст чёткого представления о динамике изменения реального значения РМ. Например, при изменении  $\cos\varphi$  от 0,95 до 0,94 РМ изменяется на 10 %, а при изменении от 0,99 до 0,98 – приращение составляет уже 42 %.

При расчётах удобнее оперировать соотношением, которое называют коэффициентом реактивной мощности:

$$K_{p.m.} = \frac{Q}{P} = \operatorname{tg}\varphi. \quad (3.6)$$

Режим работы системы промышленного электроснабжения определяется схемой и параметрами электрической сети, нагрузками в узлах, режимом работы регулирующих и компенсирующих устройств.

Многие из этих факторов подвержены изменениям. Для обеспечения наиболее экономичных режимов систем электроснабжения, характеризующих-

ся неравномерным графиком суточного потребления реактивной мощности, целесообразным является регулирование мощности компенсирующих устройств.

### **Перечень используемого оборудования.**

Стенд на основе автоматического регулятора реактивной мощности (АРРМ) MRM-12cs.

### **Порядок проведения работы.**

- 1 Изучить и проанализировать природу реактивной мощности, способы ее уменьшения (компенсации).
- 2 Комплектные конденсаторные установки (ККУ) и схемы их соединений.
- 3 Практическая работа на стенде по компенсации реактивной энергии.
- 4 Анализ работы. Составление отчета.

### **Содержание отчета.**

- 1 Цель работы.
- 2 Технические данные автоматического регулятора реактивной мощности MRM-12cs:
  - а) номенклатура MRM-12cs;
  - б) назначение;
  - в) номинальные параметры;
  - г) составные части и узлы;
  - д) схема принципиальная MRM-12cs.
- 3 Технические данные АРРМ ПРОПНІ:
  - а) номенклатура ПРОПНІ;
  - б) назначение;
  - в) номинальные параметры;
  - г) составные части и узлы;
  - д) схема принципиальная ПРОПНІ.
- 4 Сравнительный анализ автоматических регуляторов реактивной мощности MRM-12cs и ПРОПНІ.
- 5 Выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Основные термины и определения, расшифровка сокращений и понятий по теме лабораторной работы.
- 2 Реактивная мощность, положительные и отрицательные стороны.
- 3 Пояснить принцип продольной компенсации, область применения продольной компенсации.
- 4 Пояснить принцип поперечной компенсации, область применения поперечной компенсации.
- 5 Принцип работы синхронного компенсатора, область применения.
- 6 Способы компенсации реактивной мощности.



7 Пояснения принципа работы схем нерегулируемых на основе конденсаторных батарей (КБ).

8 Пояснения принципа работы схем регулируемых на основе КБ.

9 Основные потребители реактивной мощности.

#### **4 Лабораторная работа № 4. Измерение и учёт активной и реактивной мощности**

##### **Цель и задачи выполнения работы.**

1 Изучить схемы включений счетчиков активной и реактивной энергии.

2 Получить навыки работы со счетчиками активной и реактивной энергии.

##### ***Краткие теоретические сведения***

Получение и распределение электроэнергии в сетях предприятий учитывается и контролируется по удельным нормам  $W_{уд}$  – расходу электроэнергии на единицу продукции и по лимитам планового потребления электроэнергии.

Каждое предприятие ежегодно получает необходимый лимит на электроэнергию, как и на другие материальные ресурсы – топливо, металл и т. д. Контроль за лимитированным потреблением электроэнергии возложен на органы Госэнергонадзора при энергосбытах. Последние ведут ежедневный учет расхода электроэнергии предприятиями.

Учет разделяется на расчетный и технический (контроль). Первый служит для расчета предприятия с энергосберегающей организацией, второй – для осуществления хозрасчета и контроля расходования электроэнергии внутри предприятия.

Расчетные счетчики активной и реактивной энергии устанавливаются на подстанциях энергосистемы, на отходящих линиях всех направлений, если эти линии питают только данное предприятие. Если от линии питаются несколько самостоятельных предприятий, то счетчики устанавливаются на стороне высшего напряжения вводов, если имеются трансформаторы тока класса 0,5; в противном случае, счетчики устанавливаются на стороне низшего напряжения, а потери в трансформаторах определяются расчетным путем и оплачиваются предприятием.

Технический учет электроэнергии служит для:

– межцехового расчета за электроэнергию, израсходованную отдельными цехами и другими хозрасчетными подразделениями предприятия;

– нормирования расхода электроэнергии на единицу продукции или полуфабриката;

– контроля потребления и выработки реактивной энергии отдельными цехами и крупными энергоприемниками, а также для стимулирования и контроля мероприятий по экономии электроэнергии.

На установку счетчиков не требуется разрешения энергоснабжающей организации.

Контрольный учет внутри предприятия должен отражать отдельно расход электроэнергии на силовую нагрузку (электропривод), электротехнологию и освещение. Поэтому все осветительные линии напряжением 380/220 В должны быть оснащены счетчиками активной энергии. При питании освещения отдельными трансформаторами счетчики устанавливаются на стороне высшего напряжения трансформатора.

Классы точности счетчиков активной энергии и измерительных трансформаторов согласно правилам технической эксплуатации (ПТЭ) должны быть не ниже, указанных на рисунке 4.1.

Трансформаторы ГПП	Класс счётчиков	Класс измерительных трансформаторов
Более 60 МВ·А	0,5	0,2
До 60 МВ·А	1,0	0,5
До 10 МВ·А	2,0	0,5

Рисунок 4.1 – Трансформаторы и классы точности счётчиков

На всех отходящих от трансформаторных подстанций (ТП) линиях напряжением до 1000 В, питающих хозрасчетные участки цехов, устанавливаются счетчики активной энергии. На линиях, питающих ТП, также устанавливаются счетчики активной энергии, как и на всех линиях к потребителям электрической энергии (ПЭЭ) напряжением выше 1000 В – двигателям и электропечам.

Контрольный учет реактивной энергии осуществляется на всех компенсирующих установках: конденсаторах, синхронных компенсаторах и двигателях. Следует учитывать направление реактивной энергии, т. к. в схеме включения счетчиков все компенсирующие устройства являются «генераторами». Учет потребляемой реактивной энергии производится на всех линиях к ТП и мощным ПЭЭ напряжением выше 1000 В – двигателям и электропечам.

Механизм счетчика монтируется на литой стойке и закрывается кожухом. Состоит из вращающихся элементов (по два для 3-проводной сети и по три для 4-проводной сети); подвижной системы с двумя укрепленными на общей оси дисками и счетного механизма.

На оси подвижной системы укреплен антисамоходный флажок для устранения самохода. Тормозной момент создается двумя постоянными магнитами и регулируется перемещением магнитов. Для балансировки вращающихся элементов счетчика на каждом из них имеются по два магнитных шунта-регулятора. Регулировка малых нагрузок производится регуляторами, имеющимися на каждом вращающемся элементе. Предварительная регулировка внутреннего угла сдвига магнитных потоков в каждом элементе осуществляется разрезанием короткозамкнутых витков. Точная регулировка осуществляется с помощью проволочного сопротивления (шлейфа), припаянного к концам обмотки, имеющимся на сердечнике трансформатора тока. Схемы подключения счётчиков изображены на рисунках 4.2 и 4.3.

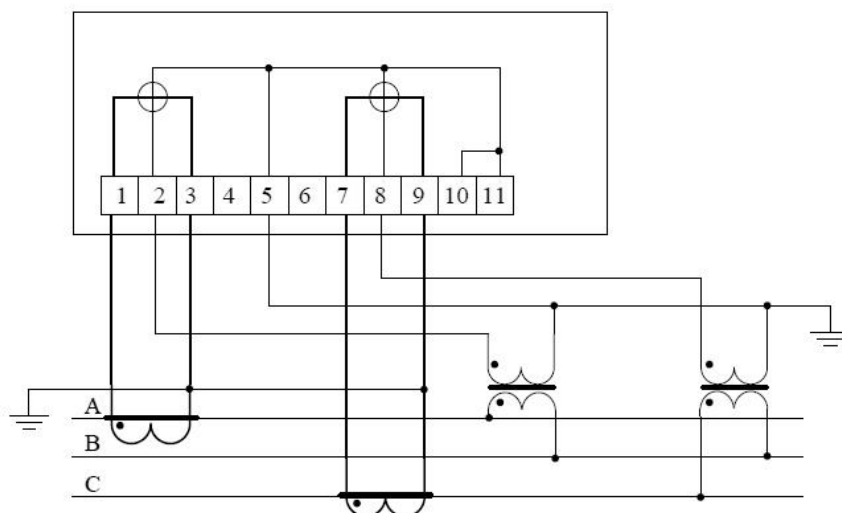


Рисунок 4.2 – Схема подключения двухэлементного трансформаторного счетчика

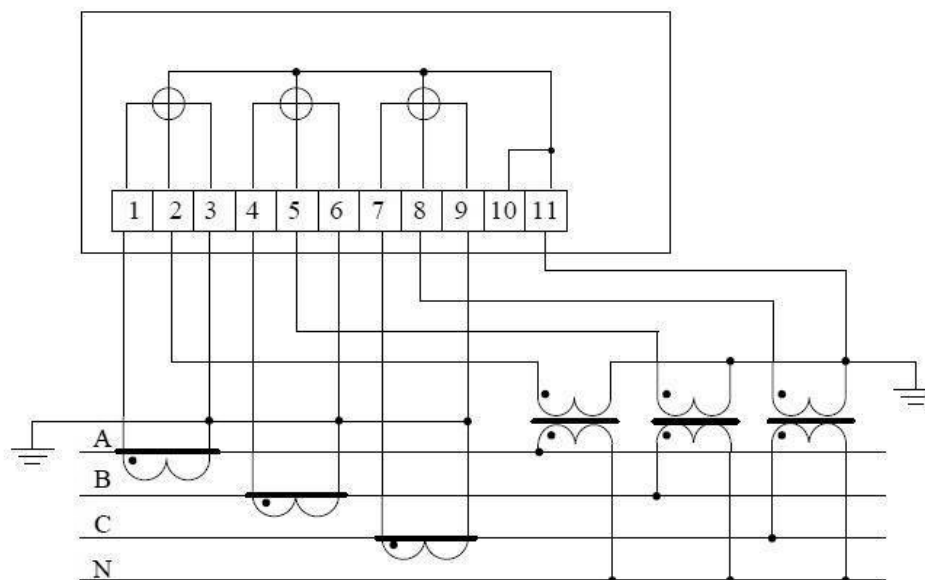


Рисунок 4.3 – Схема подключения трёхэлементного трансформаторного счетчика

### Задание

- 1 Ознакомиться с общими сведениями по изменению и учету электрической энергии.
- 2 Ознакомиться со схемой и оборудованием стенда.
- 3 Изучить схемы включений счетчиков.
- 4 Получить практические навыки работы со счетчиками.
- 5 Провести анализ. Составить отчет.

### Перечень используемого оборудования.

Лабораторный стенд для измерения и учёта активной и реактивной мощности. Электрическая схема лабораторного стенда изображена на рисунке 4.4.

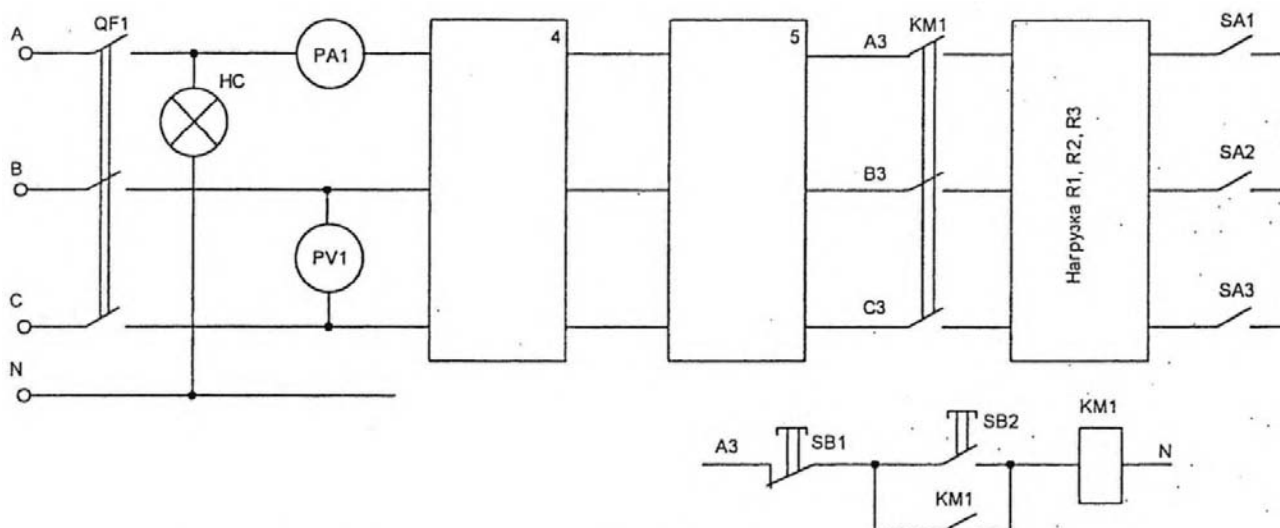


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема измерения активной и реактивной энергии

Стенд работает в следующих режимах:

- измерение и учет активной мощности;
- измерение и учет реактивной мощности.

На фазы А, В, С подается  $U = 380$  В, 50 Гц.

РА1 – амперметр электромагнитной системы на 50 А.

PV1 – вольтметр электромагнитной системы на 500 В.

Счетчик активной энергии типа СА4-И673М.

Счетчик реактивной энергии типа СР4-И673М.

### Порядок проведения работы.

Для включения стенда в работу необходимо подать питание на стенд от автомата № 4 ПР24, на стенде включить автоматический выключатель QF1. При этом загорится сигнальная лампочка QL1. По прибору PV1 контролируется наличие подачи напряжения на лабораторный стенд.

Нажатием кнопки SB2 включается асинхронный двигатель (АД) (нагрузка) путем включения магнитного пускателя KM1. Затем переключаем «возб.», включается цепь напряжения возбуждения машины постоянного тока (МПТ). Тумблерами SA1...SA3 сопротивления R1...R3 вводятся в цепь нагрузки.

По счетчикам активной и реактивной энергии Р1 и РК ведется замер расхода электрической энергии.

Для отключения стенда необходимо выключить тумблеры SA1...SA3, отключить обмотки возбуждения МПТ (переключатель «возб.»). Отключение АД осуществляется нажатием кнопки SB1 «СТОП» (разрыв цепи магнитного пускателя KM1). Затем отключается автоматический выключатель и автомат № 4 ПР24.

### Содержание отчета.

1 Цель работы.

2 Технические данные счетчиков активной энергии серии СА:

а) номенклатура счетчиков активной энергии серии СА;

- б) назначение;
  - в) номинальные параметры;
  - г) составные части и узлы;
  - д) схема включения счетчиков реактивной энергии серии СА.
- 3 Технические данные счетчиков активной энергии серии СР:
- а) номенклатура счетчиков активной энергии серии СР;
  - б) назначение;
  - в) номинальные параметры;
  - г) составные части и узлы;
  - д) схема включения счетчиков активной энергии серии СР.
- 4 Технические данные счетчиков активной энергии серии Дельта:
- а) номенклатура счетчиков активной энергии серии Дельта;
  - б) назначение;
  - в) номинальные параметры;
  - г) составные части и узлы;
  - д) схема включения счетчиков энергии серии Дельта.
- 5 Сравнительный анализ счётчиков серии СА и Дельта.
- 6 Выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Принцип работы счётчика серии СА.
- 2 Принцип работы счётчика серии СР.
- 3 Схемы подключения счётчиков серии СА.
- 4 Схемы подключения счётчиков серии СР.
- 5 Трансформаторное подключение счётчиков. Преимущества и недостатки.
- 6 Бестрансформаторное подключение счётчиков. Преимущества и недостатки.
- 7 Классы точности счётчиков.
- 8 Классификация счётчиков.
- 9 Основные термины и определения, расшифровка сокращений и понятий по теме лабораторной работы.

## 5 Лабораторная работа № 5. АПВ и АВР в сетях электроснабжения промышленных установок

### Цель и задачи выполнения работы.

1 Изучить схемы автоматического управления воздушными линиями АПВ и АВР.

2 В условиях лабораторной работы практически оценить работу защиты, работу АПВ без ускорения, АПВ с ускорением, АВР и их согласованную работу.

### *Краткие теоретические сведения*

В системах электроснабжения промышленных предприятий для повышения надежности работы применяют следующие виды автоматики.

- 1 Автоматическое повторное включение.
- 2 Автоматическое включение резервного питания и оборудования.
- 3 Автоматическое регулирование мощности компенсирующих устройств.
- 4 Автоматическая аварийная разгрузка по частоте (АЧР).
- 5 Самозапуск синхронных и асинхронных двигателей.

Устройства автоматики в системах электроснабжения выполняются как на оперативном переменном, так и на оперативном постоянном токе. При проектировании новых схем автоматики предпочтение следует отдавать в первую очередь оперативному переменному току. Оперативный постоянный ток должен применяться в особо ответственных установках. Путем выпрямления переменного тока можно применять стандартную аппаратуру постоянного тока.

*Автоматическое повторное включение.* Сущность АПВ состоит в том, что элемент системы электроснабжения, отключившийся при срабатывании релейной защиты, через определенное время (0,5...1,5 с) снова включается под напряжение (если нет запрета на обратное включение), и если причина, вызвавшая отключение элемента, исчезла, то он остается в работе.

Среди наиболее частых причин, вызывающих неустойчивые повреждения элементов системы электроснабжения, можно назвать перекрытие изоляции лишь при атмосферных перенапряжениях, схлестывание проводов при сильном ветре или пляске, замыкание линий или шин различными предметами, отключение линий или трансформаторов вследствие кратковременных перегрузок или неизбежного срабатывания релейной защиты и т. д. В связи с этим АПВ с большим успехом может применяться для воздушных и кабельных линий, секций или систем шин, двигателей и одиночных трансформаторов.

Однако при применении АПВ трансформаторов в схеме АПВ должен быть наложен запрет АПВ при отключении трансформаторов под действием газовой или дифференциальной защиты.

Стоимость устройства АПВ ничтожно мала по сравнению с убытками производства, вызываемыми перерывами в электроснабжении. Применение устройства АПВ различных элементов системы электроснабжения значительно повышает надежность электроснабжения даже при одном источнике питания.

В системах электроснабжения промышленных предприятий в основном применяются устройства АПВ однократного действия, как наиболее простые и дешевые. С увеличением кратности действия АПВ их эффективность уменьшается.

Для упрощения и увеличения надежности устройств АПВ применяют комплекты АПВ с реле типов РИВ-58, РПВ-258, РПВ-358 и их модификаций.

АПВ электродвигателей применяется для осуществления повторного пуска электродвигателей, отключаемых для обеспечения самозапуска электродвигателей ответственных механизмов. Это необходимо в тех случаях, когда при особо тяжелых условиях самозапуска наряду с отключением двигателей ответственных механизмов отключается и ряд двигателей ответственных механизмов.

*Автоматическое включение резерва.* Автоматическое включение резервного питания или оборудования должно предусматриваться во всех случаях, когда перерыв в электроснабжении вызывает убытки, значительно превышающие стоимость установки устройства АВР.

Устройства АВР применяются только в тех случаях, когда имеется в наличии или проектируется дополнительный (резервный) источник питания, например, трансформатор, линия, секция шин. В этом случае при отключении рабочего источника устройством АВР включается второй источник питания, нормально находящийся в резерве. Такие системы действуют надежно, но требуют для своего осуществления значительных капитальных затрат.

Для устранения этого недостатка чаще всего применяются устройства АВР для оборудования, которое в нормальном режиме тоже работает, но используется не полностью, что часто отвечает экономически целесообразному режиму работы этих установок, например, КПД трансформатора максимален при 60 %...80 % номинальной нагрузки. В этом случае при отключении одного (рабочего) источника второй под действием устройства АВР принимает на себя всю нагрузку и, перегружаясь в допустимых пределах, обеспечивает бесперебойное электроснабжение установки.

Здесь уместно отметить, что такого же эффекта можно добиться при параллельной работе двух или большего числа источников питания электроэнергией и отключении поврежденного элемента средствами только релейной защиты, без устройства АВР. Однако такое включение источников питания системы электроснабжения вызывает увеличение токов короткого замыкания, значительное усложнение работы релейной защиты, удорожание её и часто не обеспечивает необходимой избирательности действия.

Автоматическое включение резервного питания и оборудования линий, силовых трансформаторов, генераторов, сборных шин, секций и систем, электродвигателей, электрического освещения, как правило, происходит после отключения любыми видами защит, а также при ошибочных действиях обслуживающего персонала, или самопроизвольном отключении выключателей.

При выполнении устройств АВР питания и оборудования должны соблюдаться следующие условия.

1 Для предотвращения включения резервного источника на КЗ в неотключившемся рабочем источнике схема АВР не должна работать до исключения выключателя рабочего источника.

2 Действие АВР должно быть однократным. Для ускорения отключения резервного источника питания при включении его на неустранившееся КЗ обычно предусматривается ускорение защиты резервного источника после АВР.

3 При установке устройства АВР, кроме основной максимальной токовой защиты на рабочем источнике питания (вводе, трансформаторе и т. д.), должен устанавливаться пусковой орган минимального напряжения, для того чтобы схема АВР могла действовать при исчезновении напряжения на шинах, питающих рабочий источник.

4 Если на рабочем источнике питания предусмотрено устройство АПВ, то в случае недопустимости параллельной работы рабочего и резервного источника питания (например, отсутствие между ними синхронизма, возможность неправильной работы защиты при параллельной работе и т. д.) следует предусмотреть блокировку от параллельной работы.

Устройства АВР выполняются как на оперативном переменном, так и на оперативном постоянном токе. Источником питания оперативного переменного тока служат трансформаторы напряжения, установленные на рабочем или резервном вводе или на шинах подстанции, в зависимости от схемы устройства АВР.

Эффективность действия АВР в системах электроснабжения составляет 90 %...95 %. Простота схем и высокая эффективность обусловили широкое применение АВР в электрических сетях и энергосистемах.

### **Задание**

1 Ознакомиться с общими сведениями по устройствам автоматики систем электрообеспечения.

2 Ознакомиться со схемой и оборудованием стенда.

3 Изучить схемы включений устройств автоматики.

4 Получить практические навыки работы с устройствами автоматики.

5 Провести анализ. Составить отчет.

### **Перечень используемого оборудования.**

В качестве лабораторного оборудования используется стенд для исследования режимов работы устройств автоматики систем электроснабжения.

Лабораторный стенд может работать в следующих режимах.

1 Нормальный режим электроснабжения.

2 Автоматическое отключение при наличии КЗ.

3 АПВ без ускорения.

4 АПВ с ускорением.

5 АВР.

6 Согласованная работа АПВ и АВР.



### **Порядок проведения работы.**

1 Режим «Нормальная работа» достигается путем включения автоматов № 4 РР24 и QF1, QF2 на стенде, на котором загорается лампочка HL0 и срабатывает реле времени КТА. Поворотом вправо ключей SA1, SA3 и включением тумблера KM9 включается линия 1 и нагрузка включается (загораются сигнальные лампы HL1, HL3, HL10, HL11), линия 2 – ключами SA2, SA4 и тумблером KM8. При этом загораются HL2, HL4, HL12, HL13.

2 Автоматическое отключение при наличии КЗ. Включением ключа K2 создаем КЗ в линии 2. Срабатывает реле времени КТ2 и отключает линию 2 от системы (выдержка времени отключения регулируется при помощи КТ2). Гаснут лампочки HL2, HL4, HL12.

3 АПВ без ускорения. Ключ SA1 переводим в левое положение. При этом срабатывает РПВ и загорается HL1 (если этого не произошло, то следует повернуть SA1 в нейтральное положение, а затем перевести снова HL10 в левое положение). Поворотом вправо включить SA3, загорятся HL3, HL10, HL11. Включением ключа K1 создаем КЗ. Срабатывает реле истечения времени КТ1 и РПВ, а также включится сигнальное реле КН1. По истечении выдержки времени на КТ1 произойдет автоматическое отключение линии от системы и через некоторый промежуток времени сработает АПВ. Если КЗ не устранилось, АПВ будет неуспешным. При исчезновении КЗ происходит успешное АПВ, о чем сигнализирует HL1. Тогда с помощью ключа SA3 подключается нагрузка к линии 1.

4 АПВ с ускорением. Исходное состояние: линия 1 работает в нормальном режиме. Включаем тумблер ускорения защиты SA10 и производим операции в последовательности, указанной в п. 3. Срабатывает КТ1, затем РПВ, КН1, КН2, сигнализирующие о работе АПВ с ускорением защиты. При неуспешном АПВ линия 1 отключается.

5 АВР. Исходное состояние: линия 2 работает в нормальном режиме, а линия 1 является резервом питания. Включаем SA11 в положение «АВР автоматическое» (вверх). Тумблер KM9 отключаем. Создаем КЗ на линии 2 путем включения K2. При этом линия 2 отключается, включается АВР и питание нагрузки осуществится с линии 1. Загораются сигнальные лампочки: HL1, HL3, HL5, HL12, HL13.

6 Согласованная работа АПВ и АВР. Линию 1 включаем аналогично п. 3, линия 2 – в нормальном режиме. Устраиваем ключом K1 КЗ на линии 1. При этом включатся сигнальные реле КН1 и КН3, срабатывает АПВ. При неуспешном АПВ включится АВР, т. е. нагрузки HL10, HL11 подключатся к линии 2. Загорятся лампочки HL2, HL4, HL5.

### **Содержание отчета.**

1 Цель работы.

2 Технические данные автоматического повторного включения на основе РПВ-58:

- а) номенклатура РПВ-58;
- б) назначение;

- в) номинальные параметры;
- г) составные части и узлы;
- д) схема принципиальная РПВ-58.

3 Технические данные автоматического включения резерва на основе Energy Controller AVR v 5.21:

- а) номенклатура Energy Controller AVR v 5.21;
- б) назначение;
- в) номинальные параметры;
- г) составные части и узлы;
- д) схема принципиальная Energy Controller AVR v 5.21.

4 Выводы.

### ***Контрольные вопросы***

1 Основные термины и определения, расшифровка сокращений и понятий по теме лабораторной работы.

2 Что такое надёжность электрообеспечения? Критерии оценки.

3 Устройства, повышающие надёжность электрообеспечения.

4 Причины применения АПВ. Классификация АПВ. Основные требования.

5 Пояснение принципа работы АПВ на схемах. Особенность применения АПВ однократного и многократного действия.

6 Классификация АВР. Основные требования к АВР.

7 Пояснение принципа работы АВР на схемах. Причина применения АВР. Ускорение защит при АВР.

8 Классификация потребителей по надёжности. Уточнение каждой категории.

9 Пояснения принципа работы АЧР.

## **6 Лабораторная работа № 6. Распределение напряжения по гирлянде подвесных изоляторов**

### **Цель и задачи выполнения работы.**

1 Изучить распределение напряжений по элементам гирлянды подвесных изоляторов.

2 Ознакомиться с применением высоковольтной измерительной штанги.

### ***Краткие теоретические сведения***

Изоляторы являются одной из ответственных частей электрических установок. Они служат для крепления токоведущих частей друг от друга и изоляции их от земли.

В зависимости от назначения изоляторы бывают стационарные, линейные и аппаратные.

Станционные изоляторы применяются для крепления и изоляции шин в открытых и закрытых распределительных устройствах. Станционные изоляторы подразделяются на опорные и проходные.

Линейные изоляторы служат для крепления проводов воздушных линий электропередачи и шин открытых распределительных устройств. Линейные изоляторы бывают штыревые и подвесные.

Аппаратные изоляторы служат для крепления токоведущих аппаратов частей и могут иметь различную форму.

Изоляторы обычно изготавливаются из фарфора, стекла и полимерных материалов, которые обладают необходимой электрической и механической прочностью, теплостойки и не боятся сырости. Внешнюю поверхность фарфоровых изоляторов покрывают слоем блестящей глазури белого или коричневого цвета.

По роду установки различают изоляторы для наружной и внутренней установки. Изоляторы различаются также по номинальному напряжению, механической прочности, а проходные изоляторы – и по номинальному току.

Изоляторы должны обладать достаточной механической прочностью, для того чтобы выдерживать электродинамические возникающие усилия, при протекании по шинам токов короткого замыкания.

В зависимости от механической прочности станционные изоляторы подразделяются на группы. Механическая прочность изоляторов отдельных групп характеризуется следующими величинами минимальной разрушающей нагрузки на изгиб:

группа А	– 375 кг;	группа Д и I	– 2000 кг;
группа Б	– 750 кг;	группа II	– 3000 кг;
группа В	– 1250 кг;	группа III	– 4000 кг.

Допускаемая нагрузка на изолятор принимается равной 60 % разрушающей. Классификация изоляторов представлена в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Классификация изоляторов

По назначению	По конструктивному исполнению	
	Для работы в помещении	Для работы на открытом воздухе
Опорные	1 С гладкой поверхностью 2 С ребристой поверхностью	1 Штыревые 2 Стержневые
Проходные	1 С токоведущей шиной 2 Без токопровода	Для наружно-внутренней установки
Высоковольтные	–	1 Герметичного исполнения 2 Негерметичного исполнения
Линейные	–	1 Штыревые 2 Тарельчатые 3 Стержневые

Напряжение по элементам гирлянды подвесных изоляторов распределяется неравномерно, т. е. на первом от провода элементе падение напряжения будет больше, чем на любом из следующих. При включении гирлянды изоляторов на переменное напряжение каждый элемент гирлянды можно представить

некоторой емкостью  $C = 50...70$  пФ (рисунок 6.1). Кроме того, каждый изолятор будет обладать некоторой емкостью по отношению к земле  $C^* = 4...5$  пФ и емкостью к проводу  $C_{II} = 0,5...1$  пФ. Емкостные токи, идущие через емкости  $C^*$  и  $C_{II}$  можно назвать поперечными, а ток по цепочке емкостей  $C$  – продольным током, протекающим через емкость изолятора, ближайшего к траверсе.

Степень неравномерности распределений напряжения  $U$  по элементам гирлянды зависит главным образом от отношения  $C^*/C$ . Чем меньше это отношение, тем, очевидно, равномерней будут нагружены изоляторы, т. е. ослабляется влияние поперечных емкостных токов гирлянды на ее продольной емкостной цепочке изоляторов. Отношение  $C^*/C$  оказывает значительно меньшее влияние на распределение напряжения по элементам, однако в длинных гирляндах влияние оказывается отчетливо, и величины  $C^*$  на элементах гирлянды, ближайших к траверсе, увеличиваются.

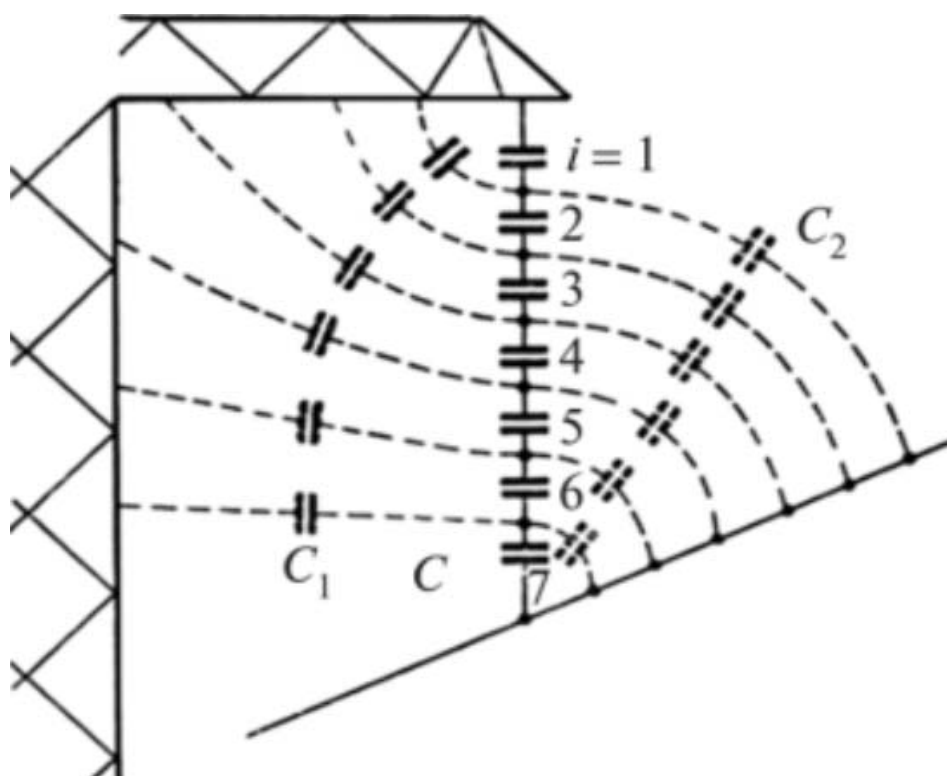


Рисунок 6.1 – Схема замещения гирлянды подвесных изоляторов

Измерение распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов в эксплуатации производится с помощью высоковольтных контрольных или измерительных штанг. На электроды изолятора накладываются шунты, к которым подсоединен измерительный прибор или регулируемый искровой промежуток, которые крепятся на измерительной штанге. Перенося шунты штанги с одного изолятора на другой, поочередно измеряют напряжение  $U^*$  на изоляторах гирлянды.

### Задание

- 1 Ознакомиться с общими сведениями по изоляторам.
- 2 Ознакомиться со схемой включения и принципом работы шарового разрядника.
- 3 Ознакомиться со схемой включения и принципом работы лабораторного стенда для испытания обмоток трансформатора повышенным напряжением промышленной частоты.
- 4 Получить практические навыки работы с приборами для испытания распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов.
- 5 Провести анализ. Составить отчет.

### Перечень используемого оборудования.

В качестве измерительного оборудования применяются:

- шаровой разрядник;
- лабораторный стенд для испытания обмоток трансформатора повышенным напряжением промышленной частоты.

### Порядок проведения работы.

1 С помощью шарового разрядника исследовать распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов. Для этого шаровой разрядник укрепляется на первом от провода изоляторе и на гирлянду подается напряжение от высоковольтного испытательного трансформатора. Напряжение, подводимое к гирлянде, постепенно повышается до появления пробоя в разряднике. Контроль за напряжением производится по вольтметру со стороны высокого напряжения.

2 Далее следует поочередно переставлять растров разрядника  $C$  первого от провода элемента до конца гирлянды, повышая напряжение, подаваемое на гирлянду, до возникновения разряда между шарами. Для каждого элемента напряжение гирлянды брать как среднее из трех значений. Результаты занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Результаты измерений напряжения на гирлянде изоляторов

Номер элемента от провода	Показание вольтметра на высокой стороне трансформатора $U_V$ , кВ				Напряжение на элементе, $U_{np}$ , кВ (по таблице МЭК)	Относительная величина напряжения на элементе $\bar{U}$ , %	Относительная величина напряжения на элементе с поправкой $\bar{U}_n$ , %
	1	2	3	Среднее			

У применяемого шарового разрядника нельзя изменять расстояние между шарами под напряжением, а следовательно, и измерять распределение напряжения в абсолютных единицах. Относительную величину напряжения, приходящуюся на данный элемент, можно найти по уравнению

$$\bar{U} = U_V / U_{np} \cdot 100 \%, \quad (6.1)$$

где  $U_{np}$  – пробивное напряжение на шаровом разряднике, кВ; определяется по таблицам международной электротехнической комиссии (МЭК) для нормальных условий;

$U_V$  – напряжение, подаваемое на гирлянду, измеренное по вольтметру на высокой стороне трансформатора, кВ;

$\bar{U}$  – относительное значение напряжения на изоляторе.

При определении напряжения с помощью шарового разрядника необходимо учесть влияние относительной плотности воздуха по следующим уравнениям:

$$\bar{U} = U_V / U_{np} \cdot \delta \cdot 100 \%; \quad (6.2)$$

$$\delta = 0,386 \cdot P / (274 + \theta), \quad (6.3)$$

где  $P$  – атмосферное давление, при котором проводится измерение, Па;

$\theta$  – температура, при которой проводится измерение, °С.

Критерием правильности полученных результатов является выполнение уравнения

$$\sum_1^n \bar{U}_n = 100 \%, \quad (6.4)$$

где  $n$  – число элементов в гирлянде.

3 По данным таблицы 6.2 построить кривые падения напряжения на элементах гирлянды в процентах от приложенного напряжения в зависимости от номера элемента.

### **Содержание отчёта.**

1 Цель работы.

2 Технические данные изоляторов, производимых на территории Республики Беларусь:

- а) номенклатура изоляторов;
- б) назначение;
- в) номинальные параметры;
- г) составные части и узлы;
- д) монтаж изоляторов.

3 Результаты испытаний в соответствии с таблицей 6.2.

4 Выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Назначение и типы изоляторов.
- 2 Схема замещения гирлянды изоляторов.
- 3 Какие основные элементы измерительной штанги?
- 4 Пути улучшения распределения напряжения по гирлянде.
- 5 Особенности состава опорных изоляторов.
- 6 Особенности конструкции проходных изоляторов.
- 7 Назначение и особенности линейных изоляторов.
- 8 Основные термины и определения, упоминаемые в лабораторной работе.
- 9 Механические характеристики изоляторов.

## **7 Лабораторная работа № 7. Профилактические испытания изоляции высоковольтного трансформатора**

### **Цель и задачи выполнения работы.**

- 1 Изучение методов профилактических испытаний высоковольтных трансформаторов.
- 2 Получение практических навыков работы с приборами для испытания изоляции высоковольтного трансформатора.

### ***Краткие теоретические сведения***

В процессе эксплуатации в изоляции электрических аппаратов возникают дефекты (увлажнение, загрязнение, возникновение трещин, воздушных включений и т. д.), постепенно приводящие к необратимому ухудшению свойств и характеристик изоляции, т. е. к старению изоляции.

Старение электрической изоляции может быть разделено на следующие четыре категории.

1 Химическое – изменение химических свойств и структуры материала, образование новых продуктов под действием влаги, кислорода, озона и т. п.

2 Термическое – изменение свойств материала под действием высоких температур, а также вследствие местных объёмных перегревов диэлектрическими потерями.

3 Механическое – потеря механической прочности под действием ударов, гололёда, динамических усилий при коротких замыканиях.

4 Электрические – уменьшение электрической прочности под действием длительно приложенного рабочего напряжения.

Процесс образования дефектов и разрушения изоляции протекает вначале весьма медленно, на последних стадиях имеет скачкообразный характер и заканчивается пробоем изоляции.

Для характеристики состояния изоляции составляется схема замещения; отклонение в величинах тех или иных элементов схемы позволяет определить

характер возникающих в изоляции дефектов при помощи различных методов профилактических испытаний. Элементарная схема замещения изоляции приведена на рисунке 7.1. Она состоит из четырех ветвей, определяющих основные характеристики изоляции.

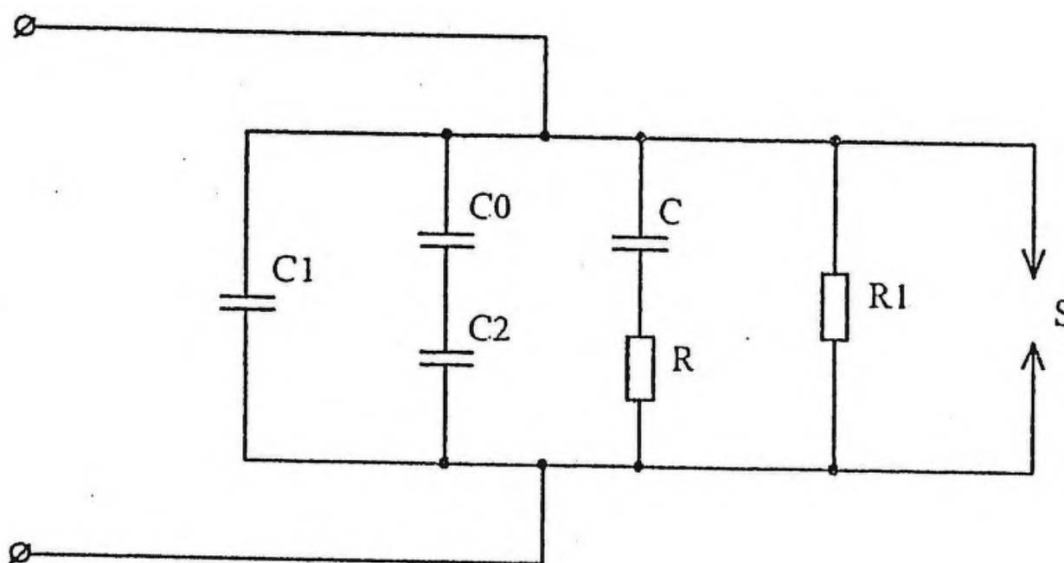


Рисунок 7.1 – Схема замещения изоляции

На рисунке  $C1-C0-C2$  – ветвь, определяющая емкость изоляции при наличии частичных разрядов;  $C0$  – емкость воздушного включения;  $C2$  – емкость той части изоляции, которая пересекается силовыми линиями, проходящими через воздушное включение;  $C1$  – емкость остальной части изоляции;  $C-R$  – ветвь, характеризующая степень неоднородности изоляции, наличие расслоений, увлажнений, загрязнений и т. д. Эта ветвь определяет начальное значение и постоянную времени спадания тока абсорбции, а также диэлектрические потери в изоляции;  $R1$  – ветвь, определяющая сопротивление изоляции постоянному току сквозной проводимости;  $S$  – ветвь, определяющая разрядное напряжение изоляции.

### ***Классификация изоляции в трансформаторах***

Каждый силовой трансформатор при оценке его электрической прочности может быть представлен состоящим из трех систем – системы частей, находящихся во включенном трансформаторе под напряжением; системы заземленных частей и системы изоляции, разделяющей как первые две системы, так и отдельные части, находящиеся под напряжением.

К системе частей, находящихся под напряжением, относятся все металлические части и детали, служащие для проведения рабочего тока (обмотки, контакты переключателей ступеней напряжения, отводы, проходные шипы и шпильки вводов и др.), а также все гальванически соединенные с ними детали (защитные экраны, емкостные кольца, металлические колпаки проходных изоляторов и т. д.).



К системе заземленных частей следует отнести: магнитную систему со всеми металлическими деталями, служащими для ее крепления; бак и систему охлаждения, также со всеми деталями и металлической арматурой в масляных трансформаторах, или защитный кожух в сухих трансформаторах.

Изоляция, разделяющая части, находящиеся под напряжением, между собой и отделяющая их от заземленных частей, в силовых трансформаторах выполняется в виде конструкций и деталей из твердых диэлектриков – электроизоляционного картона, кабельной бумаги, лакотканей, дерева, текстолита, бумажно-бакелитовых изделий, фарфора и других материалов. Части изоляционных промежутков, не заполненные твердым диэлектриком, заполняются жидким или газообразным диэлектриком – трансформаторным маслом в масляных трансформаторах, атмосферным воздухом в сухих трансформаторах. В качестве такого диэлектрика иногда применяются и другие жидкости и газы, а также практикуется заливка всего трансформатора компаундом или заполнение кварцевым песком.

Классом напряжения обмотки называют ее длительно допустимое рабочее напряжение. Класс напряжения обмотки трансформатора совпадает с номинальным напряжением электрической сети, в которую обмотка включается. Классом напряжения трансформатора считают класс напряжения обмотки ВН. Каждому классу напряжения трансформатора соответствуют номинальное рабочее напряжение и определенные испытательные переменные напряжения при 50 Гц и импульсное. Так, для класса напряжения 35 кВ номинальными напряжениями являются 31,5; 35 и 38,5 кВ; наибольшее рабочее напряжение равно 40,5 кВ; испытательное переменное напряжение 50 Гц равно 85 кВ, а импульсное для полной волны – 200 кВ.

В настоящее время применяют следующие методы контроля за состоянием изоляции трансформаторов в период их монтажа и эксплуатации.

1 Измерение сопротивления изоляции обмоток  $R_{60}$  через 60 с после приложения к ней постоянного напряжения.

2 Определение отношения значений сопротивлений изоляции обмоток  $R_{60} / R_{15}$ , измеренных через 60 и 15 с, при приложении к ним постоянного напряжения.

3 Измерение угла диэлектрических потерь изоляции обмоток  $\operatorname{tg} \delta$  при приложении к ним переменного напряжения.

4 Измерение изоляционных характеристик масла: пробивного напряжения  $U_{np}$ , угла диэлектрических потерь масла  $\operatorname{tg} \delta$  и влагосодержания масла.

5 Определение влагосодержания установленных внутри трансформатора образцов твердой изоляции.

6 Измерение отношения емкостей изоляции обмоток, соответствующих частотам приложенного напряжения 2 и 50 Гц  $C_2 / C_{50}$ .

7 Измерение прироста абсорбционной емкости  $\Delta C / C$ .

Каждый из указанных методов не позволяет однозначно определить причину и степень ухудшения изоляции, поэтому оценку состояния изоляции про-

изводят на основании комплексного рассмотрения всех вышеперечисленных испытаний.

### **Задание**

1 Ознакомиться с общими сведениями по методам профилактических испытаний высоковольтных трансформаторов.

2 Ознакомиться со схемой включения и принципом работы мегаомметром МС-05.

3 Ознакомиться со схемой включения и принципом работы устройством определения тангенса угла диэлектрических потерь Р-5026.

4 Ознакомиться со схемой включения и принципом работы лабораторного стенда для испытания обмоток трансформатора повышенным напряжением промышленной частоты.

5 Получить практические навыки работы с приборами для испытания высоковольтных трансформаторов.

6 Провести анализ. Составить отчет.

### **Перечень используемого оборудования.**

В качестве измерительного оборудования применяются:

- мегаомметр МС-05;
- устройство определения тангенса угла диэлектрических потерь Р-5026;
- лабораторный стенд для испытания обмоток трансформатора повышенным напряжением промышленной частоты.

### **Порядок проведения работы.**

1 Измерить сопротивление изоляции обмоток трансформатора мегаомметром МС-05.

2 Определить тангенс угла диэлектрических потерь прибором Р-5026.

3 Провести испытание обмоток трансформатора повышенным напряжением промышленной частоты.

Результаты измерений необходимо занести в таблицы 7.1 и 7.2.

Таблица 7.1 – Результаты испытаний изоляции трансформатора

Вип испытания	Обмотка ВН		Обмотка НН		Между обмотками	
	опытное	контрольное	опытное	контрольное	опытное	контрольное
Сопротивление изоляции, МОм						

Таблица 7.2 – Испытание масла

Номер опыта	1	2	3	4	5	Среднее
Пробивное напряжение, кВ						

**Содержание отчета.**

- 1 Цель работы.
- 2 Технические данные измерительного прибора МС-05:
  - а) номенклатура мегаомметра МС-05;
  - б) назначение;
  - в) номинальные параметры;
  - г) составные части и узлы;
  - д) схема включения мегаомметра МС-05.
- 3 Технические данные измерительного прибора Р-5026:
  - а) номенклатура прибора Р-5026;
  - б) назначение;
  - в) номинальные параметры;
  - г) составные части и узлы;
  - д) схема включения Р-5026.
- 4 Результаты испытаний в соответствии с таблицами 7.1 и 7.2.
- 5 Выводы.

***Контрольные вопросы***

- 1 Категории старения электрической изоляции.
- 2 Классификация изоляции.
- 3 Общие требования, предъявляемые к изоляции.
- 4 Методы измерения сопротивления изоляции обмоток.
- 5 Определение тангенса угла диэлектрических потерь.
- 6 Испытание пробы масла.
- 7 Испытание электрической прочности изоляции обмоток трансформатора повышенным напряжением.
- 8 Основные термины и определения, упоминаемые в лабораторной работе.
- 9 Описание приборов, предназначенных для измерения параметров изоляции.

## **8 Лабораторная работа № 8. Изучение релейной защиты в системах электроснабжения промышленных предприятий**

**Цель и задачи выполнения работы.**

Изучить способы и схемы релейной защиты в системах электроснабжения промышленных предприятий.

***Краткие теоретические сведения***

Релейной защитой называются специальные устройства (реле и другие аппараты), обеспечивающие автоматическое отключение поврежденной части электрической установки или сети. Если повреждение не представляет для установки непосредственной опасности, то релейная защита должна приводить

в действие сигнальные устройства.

Основные условия надежной работы релейной защиты следующие:

- должна иметь избирательность (селективность);
- должна обладать достаточной чувствительностью ко всем видам повреждений на защищаемой линии и на линиях, питаемых от нее, а также к изменившимся в связи с этим параметрам нормального режима работы (току, напряжению и др.), что оценивается коэффициентом чувствительности;
- должна быть выполнена по наиболее простой схеме с наименьшим числом аппаратов и обладать достаточной надежностью и быстродействием;
- должна иметь необходимую сигнализацию неисправностей в цепях, питающих аппараты релейной защиты.

Основными параметрами схем релейной защиты являются.

1 Ток срабатывания защиты  $I_{срз}$  и ток срабатывания реле  $I_{срр}$ , представляющие собой минимальные токи, при которых надежно срабатывает защита и реле. Они находятся в определенной зависимости:

$$I_{срр} = \frac{K_{сх} \cdot K_n \cdot I_{срз}}{K_{\epsilon} \cdot K_{m.m}}, \quad (8.1)$$

где  $K_{m.m}$  – коэффициент трансформации трансформатора тока;

$K_n$  – коэффициент надежности, учитывающий погрешности реле и неточности в определении  $I_{срз}$ , принимается от 1,2 и выше в зависимости от назначения защиты;

$K_{сх}$  – коэффициент схемы;

$K_{\epsilon}$  – коэффициент возврата, измеряется от 0,8...0,85;

$I_{срз}$  – ток срабатывания защиты; определяется в зависимости от назначения защиты.

2 Ток возврата  $I_B$ , при котором реле возвращается в исходное положение, меньше тока срабатывания, поэтому  $K_{\epsilon}$  меньше единицы и составляет 0,8...0,85.

Чем выше  $K_{\epsilon}$ , тем более чувствительна защита.

3 Коэффициент схемы

$$K_{сх} = \frac{I_p}{I_{m.m}} \quad (8.2)$$

представляет собой отношение тока в обмотках реле  $I_p$  к номинальному току во вторичной обмотке трансформатора тока  $I_{m.m}$ .

4 Надежность действия защиты проверяется по коэффициенту чувствительности  $K_{\nu}$ , величина которого определяется видом защиты и устанавливается правилами устройства электроустановок ПУЭ:

$$K_{\epsilon} = \frac{I_{\kappa}}{K_{m.m.} \cdot I_{c.p.}}, \quad (8.3)$$

где  $I_{\kappa}$  – минимальный ток двухфазного короткого замыкания в конце линии или на шинах низшего напряжения трансформатора.

Реле, применяемые в релейной защите, классифицируются по следующим признакам: по принципу действия (электромагнитные, индукционные, электродинамические, тепловые, электронные, магнитоэлектрические и др.), по параметру действия (тока, напряжения, мощности, тепловые и др.), по способу воздействия (отключение прямого и косвенного действия).

Максимальная токовая защита (м. т. з.) является наиболее простой защитой и поэтому широко применяется для защиты трансформаторов, электродвигателей и линий электропередач с односторонним и двусторонним питанием. Ток, возникающий в аварийных условиях, в отличие от тока нормального режима, называется сверхтоком. При возникновении аварии начинает действовать максимальная токовая защита, которая должна удовлетворять двум требованиям: правильно выявить момент возникновения аварии, что достигается установкой тока срабатывания определенной величины; правильно выбрать поврежденный участок, для чего устанавливается различное время срабатывания максимальных токовых защит участков электросети, возрастающее в направлении к источнику питания. В качестве пусковых органов м. т. з. используются максимальные токовые реле, а в качестве замедляющих – реле времени.

Токовые реле типов РТВ, ИТ-80, РТ-80 содержат в себе оба органа. Максимальная токовая защита, выполненная такими реле, называется максимальной токовой защитой с зависимой характеристикой времени срабатывания. При использовании в качестве пусковых органов максимальной токовой защиты, токовых реле мгновенного действия типа «выдержка времени» создается отдельными реле времени. Максимальная токовая защита при этом называется максимальной токовой защитой с независимой характеристикой времени срабатывания.

Рассмотрим наиболее распространенные схемы максимальной токовой защиты.

На рисунке 8.1 приведены схемы максимальной токовой защиты ( $a$  – прямое действие;  $b$  – косвенное действие), выполненные с помощью реле прямого действия типа РТВ, которые встраиваются непосредственно в привод выключателя. Защита такого типа используется в сетях напряжением до 35 кВ на выключателях, оборудованных ручными, грузовыми и пружинными автоматическими приводами со встроенными реле.

Рассмотренные схемы максимальной токовой защиты используются для защиты сетей с изолированной нейтралью, где отсутствуют однофазные замыкания на землю.

Токовая отсечка может защищать всю линию, на которую подключен только один трансформатор, если ток срабатывания отсечки выбирается так,

чтобы она не действовала при повреждении на линиях низшего напряжения, отходящих от защищаемого трансформатора.

$$I_{cnp} = \frac{K_{cx} \cdot K_H \cdot I_{к. max}}{K_{m.m}}. \quad (8.4)$$

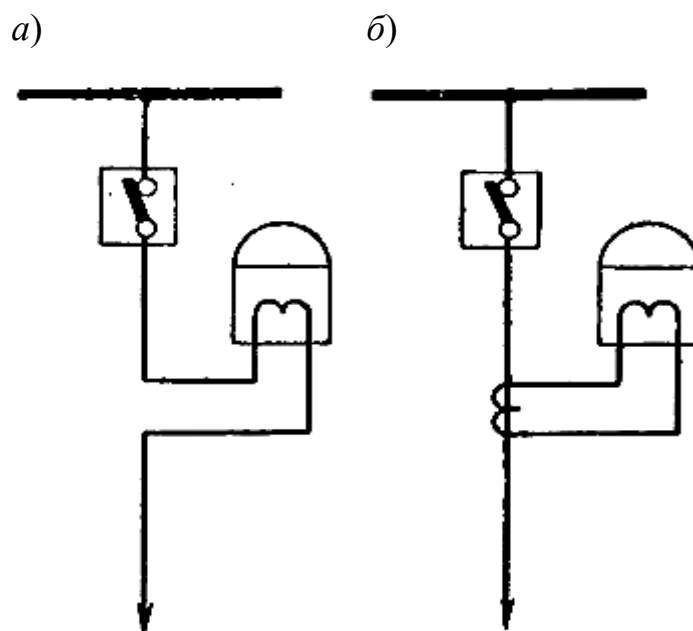


Рисунок 8.1 – Схемы максимальной токовой защиты

При этом мгновенная отсечка будет надежно защищать линию, типы и часть обмотки высшего напряжения трансформатора. Для селективного действия отсечек на линии с двусторонним питанием их токи срабатывания должны определяться по большему току.

Схемы отсечек отличаются от схем максимальных токовых защит отсутствием реле времени, вместо которых устанавливаются промежуточные реле. Токовая отсечка обычно защищает только часть линии, поэтому она применяется как дополнительная защита. Применение токовой отсечки даст возможность ускорить отключение повреждений, сопровождающихся наибольшими значениями токов КЗ, и снизить выдержки времени максимальной токовой защиты.

При сочетании токовой отсечки с максимальной токовой защитой получается ступенчатая по времени токовая защита. При этом первая ступень (отсечка) действует мгновенно, последующие ступени – с выдержкой времени. В реле РТ-80 с зависимой характеристикой времени, где имеется встроенный электромагнитный элемент отсечки, такая ступенчатость обеспечивается без установки дополнительных реле.

### Задание

1 Ознакомиться с общими сведениями по релейной защите в системах энергоснабжения промышленных предприятий.

- 2 Ознакомиться со схемой и оборудованием различного вида защиты.
- 3 Изучить схемы включений защиты в промышленные цепи.
- 4 Получить навыки работы с элементами релейной защиты.
- 5 Провести анализ. Составить отчет.

### **Перечень используемого оборудования.**

- 1 Реле максимального тока на основе РТ-80.
- 2 Реле направленной защиты на основе РТ-80.

### **Порядок проведения работы.**

- 1 Ознакомиться с принципом работы реле максимального тока на основе РТ-80.
- 2 Ознакомиться с принципом работы реле направленной защиты на основе РТ-80.

### **Содержание отчета.**

- 1 Цель работы.
- 2 Технические данные реле РТ:
  - а) номенклатура реле РТ;
  - б) назначение;
  - в) номинальные параметры;
  - г) составные части и узлы;
  - д) схема включения реле РТ-80.
- 3 Технические данные реле типа ЭТ:
  - а) номенклатура реле ЭТ;
  - б) назначение;
  - в) номинальные параметры;
  - г) составные части и узлы;
  - д) схема включения реле ЭТ.
- 4 Выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Какие виды релейной защиты вы знаете?
- 2 По каким параметрам выбирается релейная защита?
- 3 Какие основные типы реле вы знаете?
- 4 Как осуществляется максимальная токовая защита и какие виды ее вы знаете?
- 5 Как осуществляется защита воздушных линий электропередач и какие виды ее вы знаете?
- 6 Как осуществляется защита силовых трансформаторов?
- 7 Как осуществляется защита генераторов?
- 8 Как осуществляется защита электродвигателей?
- 9 Как осуществляется защита статических конденсаторов?
- 10 Основные термины и определения по теме лабораторной работы.

## Список литературы

1 **Радкевич, В. Н.** Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие / В. Н. Радкевич. – Минск : Минфин, 2018. – 437 с.

2 **Поляков, А. Е.** Электрические машины, электропривод и системы интеллектуального управления электротехническими комплексами: учебное пособие / А. Е. Поляков, А. В. Чесноков, Е. М. Филимонова. – Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2015. – 224 с.

3 **Федоров, О. В.** Стратегии инновационной деятельности: учебник / О. В. Федоров. – Москва: ИНФРА-М, 2012. – 275 с.