

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.А. Казакул

СПЕЦИАЛЬНЫЙ КУРС ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Методические указания по решению практических задач

Благовещенск
Издательство АмГУ
2022

ББК 31.27я73

К 14

*Печатается по решению
редакционно-издательского
совета
Амурского государственного
университета*

Рецензенты:

Крутько С.В. – Начальник ситуационно-аналитического центра АО «ДРСК»

К 14 Специальный курс электрических сетей: Методические указания по решению практических задач/ сост.: А.А. Казакул. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2022. - 127 с.

Описание пособия:

Методическое пособие предназначено для подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, направленность (профиль) «Электроэнергетика». Представленные практические работы направлены на всестороннее изучение способов моделирования ЭЭС для расчётов электрических режимов и токов короткого замыкания.

В авторской редакции.

©Амурский государственный университет, 2022
© Казакул А.А. (составитель), 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	4
Введение	5
Практическая работа № 1. Моделирование электрических сетей одного класса номинального напряжения в RastrWin3	6
Практическая работа № 2. Моделирование силовых трансформаторов в RastrWin3	17
Практическая работа № 3. Моделирование устройств регулирования напряжения в RastrWin3	27
Практическая работа № 4. Расчет установившегося режима электрической сети нескольких классов номинального напряжения в RastrWin3	39
Практическая работа № 5. Анализ потерь мощности с использованием RastrWin 3	43
Практическая работа № 6. Выполнение вариантных расчетов в RasrtWin3	56
Практическая работа № 7. Расчёт токов короткого замыкания в RastrWin3	64
Библиографический список	78
Приложение 1. Однолинейные схемы электрических сетей для расчётов электрических режимов	80
Приложение 2. Однолинейные схемы электрических сетей для расчётов электрических режимов в сетях с несколькими уровнями напряжений	105

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- БСК – батарея статических конденсаторов;
- ВЛ – воздушная линия;
- ВН – высшее напряжение подстанции (трансформатора);
- ЕНЭС – единая национальная электрическая сеть;
- КРМ – компенсация реактивной мощности;
- КЛ – кабельная линия;
- ЛЭП – линия электропередач;
- НН – низшее напряжение подстанции (трансформатора);
- ОИК – оперативно - измерительный комплекс;
- ПВК – программно-вычислительный комплекс;
- ПК – персональный компьютер;
- ПС – подстанция;
- САПР – система автоматизированного проектирования;
- СН – среднее напряжение подстанции;
- СТК – статический тиристорный компенсатор;
- ТКЗ – ток короткого замыкания;
- ТМ – телемеханика;
- ШР – шунтирующий реактор;
- ЭЭС – электроэнергетическая система.

ВВЕДЕНИЕ

Современные условия дефицита времени требуют от специалистов электроэнергетической отрасли принятия оперативных, технически грамотных и обоснованных решений. Такие могут быть приняты лишь грамотными и опытными специалистами на основании правильно выполненных расчётов.

Выбор параметров основного электротехнического оборудования основан на результатах расчёта установившихся электрических режимов и токов короткого замыкания, поэтому изучение программных средств расчёта установившихся режимов и токов короткого замыкания является одним из базовых навыков современного специалиста в области электроэнергетики.

Дисциплина «Специальный курс электрических сетей» входит в цикл специальных дисциплин и относится к дисциплинам, формирующим специальные профессиональные знания и навыки.

Настоящее пособие предполагает обучение студентов практическим навыкам работы в ПВК RastrWin3, для расчётов установившихся режимов и токов короткого замыкания.

В процессе освоения данной дисциплины студент формирует и демонстрирует следующие профессиональные компетенции:

- Способен участвовать в проектировании объектов профессиональной деятельности (ПК-1.)
- Способен определять параметры оборудования, рассчитывать режимы работы и участвовать в ведении режимов объектов профессиональной деятельности (ПК-2)

Выполнение представленных в настоящем пособии практических заданий позволяет сформировать указанные компетенции.

Практическая работа № 1.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ОДНОГО КЛАССА НОМИНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В RASTRWIN 3.

Цель работы: получение практических навыков по расчету режимов электрических сетей одного класса номинального напряжения в ПВК RastrWin.

ЗАДАНИЕ

В соответствии с вариантами, приведёнными в приложении 1:

1. Подготовить схему замещения для заданного участка электрической сети.
2. Рассчитать параметры схемы замещения.
3. Пронумеровать узлы схемы замещения.
4. Выполнить моделирование сети в ПВК RastrWin.
5. Подготовить графическую схему потокораспределения в ПВК RastrWin.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Составление схемы замещения осуществляется на основании однолинейной схемы для сети одного номинального напряжения. При этом ЛЭП представляются П-образной схемой замещения, количество элементов в которой определяется на основании типа ЛЭП и её номинального напряжения. Однолинейная схема включает в себя графическое представление и краткую характеристику ЛЭП, ПС с описанием основных характеристик оборудования, схемы распределительных устройств, положения коммутационных аппаратов и т.п. На некоторых однолинейных схемах размещается информация о наличии и типах устройств ПА и т.п.

При выполнении расчётов электрических режимов расчётная схема электрической сети является некоторым эквивалентом полной ЭЭС, а именно частью электрической сети. Границы участка определяются назначением расчётов и конфигурацией самой сети.

Часто при выполнении расчётов установившихся режимов в схемах используются нагрузки трансформаторов, приведённых к шинам высшего напряжения (ВН) – *приведённые нагрузки*. Такие преобразования относятся к эквивалентированию электрической сети или системы.

Под эквивалентированием электрической системы понимается совокупность операций, направленных на упрощение структуры как исходной системы (схем замещения), так и ее математической модели, с заданной точностью [13]. Таким образом, эквивалентирование предусматривает уменьшение размерности решаемой задачи и создание упрощенных моделей, что позволяет сократить объем машинных вычислений, повысить обозримость и наглядность получаемых результатов в сложившихся экономических условиях. Вместе с тем использование эквивалентных моделей позволяет снизить требования к информационному обеспечению электроэнергетических задач. Для решения задач управления электрическими сетями применяются различные эквиваленты, учитывающие их особенности. В качестве критериев эквивалентирования используется сохранение режима в узле примыкания, баланса мощностей и токов до эквивалентирования и после него, близости предельных режимов и переходных процессов исходной и эквивалентной моделей и т.п [2].

С практической точки зрения знание основных правил эквивалентирования позволяет выполнить расчёт режимов значительной части ЭЭС даже с использованием учебных версий программного обеспечения. Например, студенческая версия RastrWin позволяет сохранять схему с количеством узлов до 60, а полная модель 35-500 кВ одного региона может составлять более 1000 узлов.

При составлении расчетной схемы сети все нагрузки предварительно приводятся к стороне высшего напряжения. Приведенная нагрузка получается как сумма заданных нагрузок на шинах низшего и среднего напряжений понижающих подстанций и потерь мощности в сопротивлениях и проводимостях трансформаторов. Приведенная к стороне высшего

напряжения мощность электростанций находится путем вычитания из мощности генераторов мощности в сопротивлениях и проводимостях повышающих трансформаторов.

Для ручных расчётов режимов при определении приведенных реактивных нагрузок, кроме потерь реактивной мощности, учитываются (с соответствующими знаками) емкостные мощности линий электропередач (зарядные мощности), примыкающих к подстанциям. В расчётах с использованием ПВК зарядные мощности линий учитываются в схемах замещения ЛЭП реактивной проводимостью. Нагрузка сети высшего напряжения больше заданной нагрузки на величину потерь мощности в трансформаторах.

Приведение нагрузок к сети высшего напряжения (для расчёта в ПВК) выполняется по формуле:

$$P_{выс} + jQ_{выс} = (P_{нагр} + \Delta P_{x.x.} + \frac{P_{нагр}^2 + Q_{нагр}^2}{U_n^2} R_{тр}) + j(Q_{нагр} + \frac{P_{нагр}^2 + Q_{нагр}^2}{U_n^2} X_{тр} + \Delta Q_{x.x.}), \quad (1)$$

где $P_{нагр}$, $Q_{нагр}$ — соответственно активная и реактивная мощности нагрузок, заданных на стороне вторичного напряжения подстанций;

$R_{тр}$, $X_{тр}$ — суммарные активные и реактивные сопротивления трансформаторов данной подстанции;

$\Delta P_{x.x.}$, $\Delta Q_{x.x.}$ - активные и реактивные потери холостого хода в трансформаторе.

В учебных расчётах допускается использовать допущение о том, что в трансформаторе теряется 2% активной мощности и 10% реактивной от мощности нагрузки.

В данной практической работе нагрузка ПС задаётся на шинах ВН по мощности трансформаторов указанной на отходящей стрелке (на трансформаторе) с учётом потерь в трансформаторах, которую можно задать приближённой. Порядок определения нагрузки в практической работе показан ниже.

После подготовки схемы замещения и проверки её преподавателем необходимо задать её в ПВК RastrWin.

Порядок создания модели ПВК RastrWin для расчётов установившихся режимов

1. Запускается программа (RasrtWin.exe или Rasr3.exe)
2. Создаются необходимые шаблоны для работы.

Для этого во вкладке «Файл» необходимо выбрать – Новый. В появившемся окне отмечаются галочками файлы формата *.rg2 и *.grf. (рисунок 1).

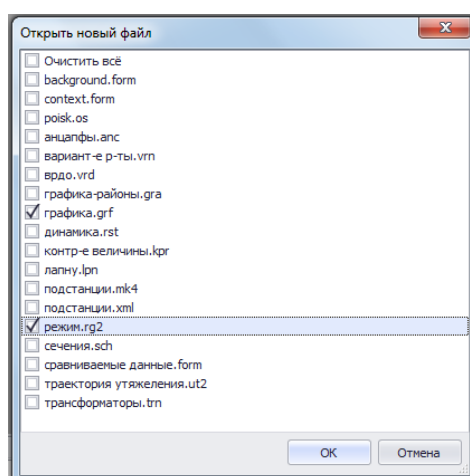


Рисунок 1– Загрузка шаблоновRasrtWin3.

3. Вводятся исходные данные

3.1 Ввод схемы рекомендуется начинать с данных по узлам. Для открытия таблицы «Узлы» в меню «Открыть» выбираем /Узлы/Узлы - рисунок 2.

Минимально необходимой информацией для каждого узла является его номер (**Номер**) и номинальное напряжение (**U_ном**). Вид таблицы «Узлы» показан на рисунке 3.

Одна строка в таблице «Узлы» моделирует один узел в схеме замещения.

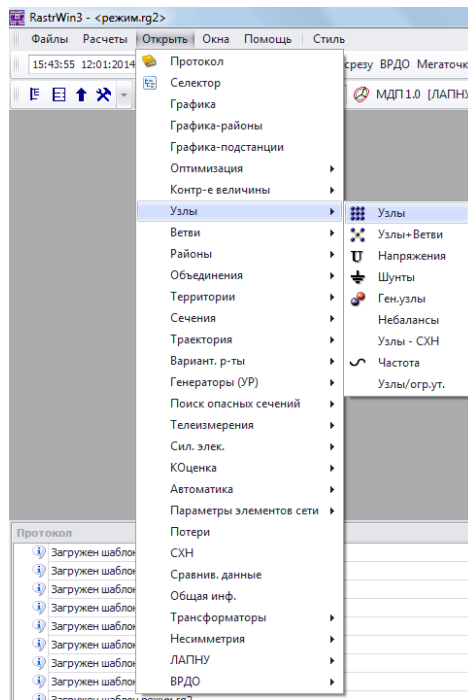


Рисунок 2 – Открытие таблицы «Узлы».

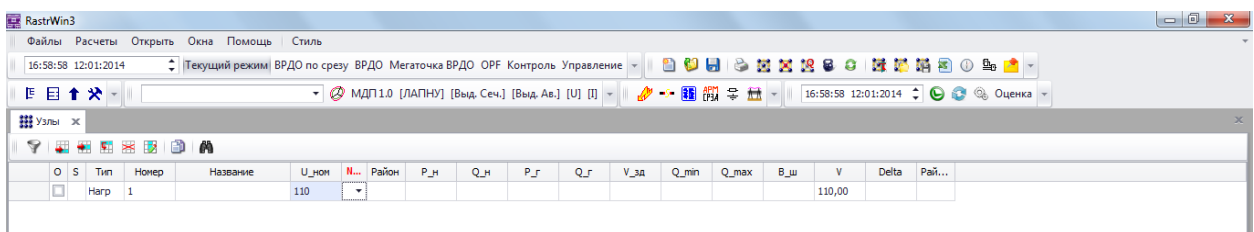


Рисунок 3 – Таблицы «Узлы» в RastrWin3.

В ПВК RastrWin при задании модели сети все узлы разделяются на нагрузочные (Нагр), генерирующие (Ген) и балансирующие (База).

Для выполнения расчётов установившихся режимов один из узлов связной схемы должен быть назначен базисным (балансирующим), для чего в меню **Тип** этого узла надо выбрать строку **База**. В данном узле необходимо задать модуль напряжения в графе **V_зд**. Напряжение данного узла согласно заданию ($U_{ип}$).

Генераторные узлы могут задаваться моделью $P, Q = \text{const}$ или моделью $P, U = \text{const}$. В первом случае в узле необходимо задать $P_г$ и $Q_г$, при этом напряжение в данном узле будет **зависимой** величиной. Во втором случае в генераторном узле необходимо задать $P_г$, **V_зд**, а так же пределы изменения реактивной мощности (Q_{min} , Q_{max}). При этом напряжение в данном узле является независимой величиной, пока соблюдаются пределы

по выработке/потреблению реактивной мощности (Q_{min} , Q_{max}). При нарушении ограничений узел переходит в модель $P, Q = const$.

3.2 Заполняется таблица «Ветви».

Для открытия таблицы «Ветви» в меню «Открыть» выбирается /Ветви/Ветви – рисунок 4.

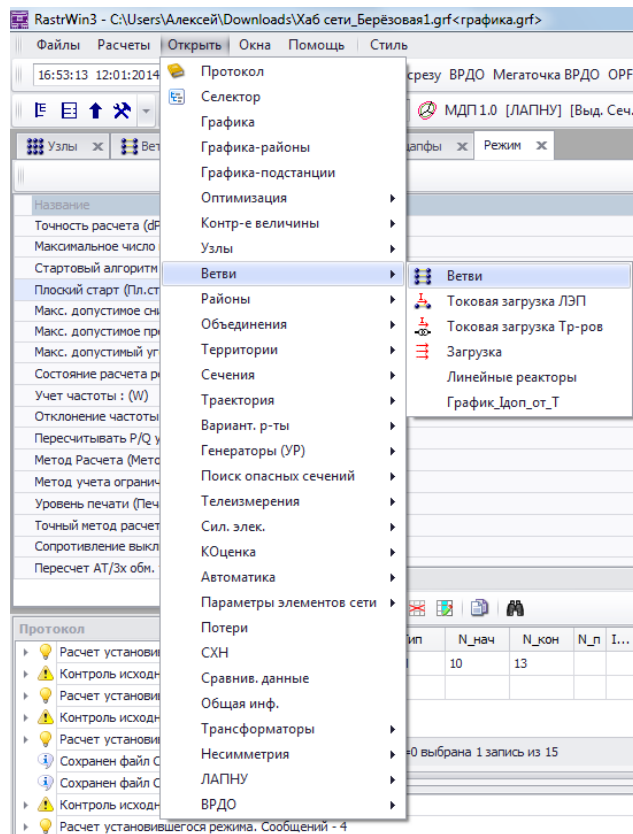


Рисунок 4 – Открытие таблицы «Ветви».

В таблице «Ветви» задаются параметры ЛЭП и трансформаторов.

При моделировании ЛЭП в таблице «Ветви» задаются номера узлов, ограничивающих ветвь, сопротивления, активная и реактивная проводимости. Сопротивления задаются в Ом (положительные), проводимости для ЛЭП в мксм со знаком минус.


Таблица «Ветви» показана на рисунке 5.

The screenshot shows the RastrWin3 application window with the 'Ветви' (Branches) table open. The table has columns for 'O', 'S', 'Тип', 'N_нач', 'N_кон', 'N_п', 'I...', 'Название', 'R', 'X', 'G', 'B', 'Кт/г', 'N_анч', 'БД...', 'Идоп_25', 'Идоп_...', 'Идоп_р...', 'I/I_dop', 'P_нач', 'Q_нач', and 'Na'. The first row shows a branch with 'O' set to 1, 'S' set to 'Выкл', and 'N_кон' set to 2.

O	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	I...	Название	R	X	G	B	Кт/г	N_анч	БД...	Идоп_25	Идоп_...	Идоп_р...	I/I_dop	P_нач	Q_нач	Na	
1		Выкл	1	2																		

Рисунок 5 - Таблица «Ветви».

Часть перечисленных параметров в таблице скрыта, изменить их видимость можно с помощью меню, вызываемого щелчком правой кнопки мыши на заголовке таблицы – «Выбор колонок».

Для работы с таблицами в RastrWin разработан универсальный набор инструментов. Для добавления/копирования строк в таблицах RastrWin3 .

Для удаления лишних строк используются кнопки. Оставляя в таблицах «Узлы» и «Ветви» пустые (нулевые) строки **нежелательно**.

После задания данных в таблицы «Узлы» и «Ветви» необходимо приступить к формированию схемы потокораспределения (графики).


3.3 Оформление графики в растр RastrWin.

Открывается окно Графика в меню Открыть/Графика (рисунок 6).

Подготовка графической схемы осуществляется на основе предварительно загруженной (составленной) расчетной схемы и заключается в последовательном выполнении следующих операций [6]:

- расстановка узлов в пространстве на условно бесконечной доске;
- улучшение внешнего вида схемы путем изменения точек присоединения ветвей и фигур к узлу и создания изломов ветвей;
- расстановка окон отображения текстовой информации;
- ввод поясняющих надписей.

После открытия окна «Графика» перед пользователем открывается условно бесконечное поле для расстановки элементов сети (рисунок 6).

Отображение заданных элементов начинается после нажатия кнопки Ввод - .

Нажимая левой кнопкой мыши на поле Графической схемы расставляются узлы, заданные ранее в соответствующей таблице «Узлы».

Номер вводимого узла отображается в диалоговом вспомогательном окне «Узел ввода» (рисунок 7).

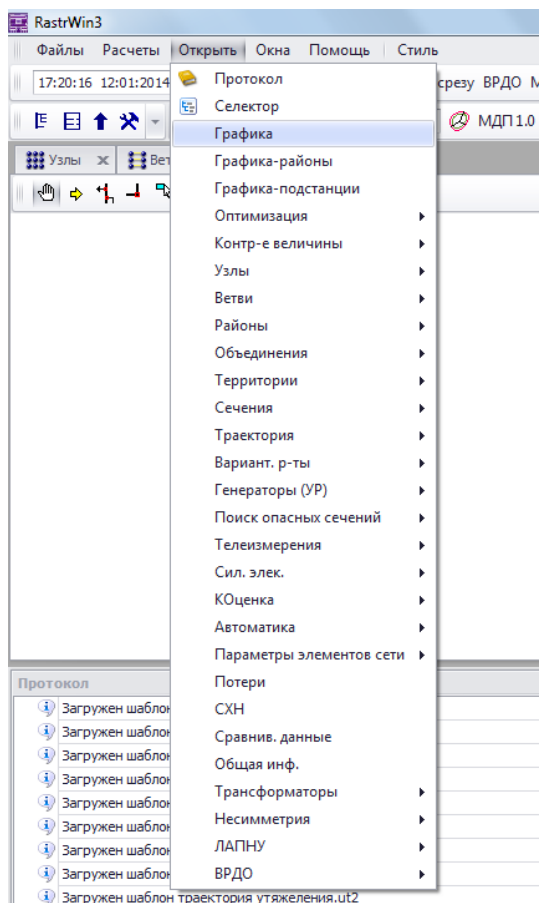


Рисунок 6 –Вызов окна для формирования графической схемы сети.

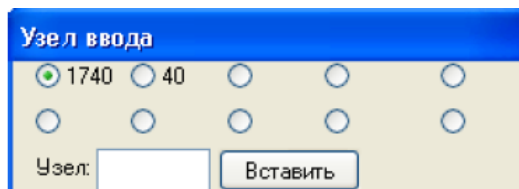





Рисунок 7 – Диалоговое окно «Узел ввода».

Для отображения на Графике узлов в порядке, отличающемся от предложений программы, необходимо установить зелёный флажок около требуемого узла. Для выбора узла, не попавшего в список, нужно ввести его номер в поле Узел и щелкнуть мышью на слове **Вставить**.

После ввода всех узлов на графическую схему выполняется улучшение внешнего вида схемы с использованием инструментов .

Основная команда для ввода узлов – **Ввод** . Она используется как для ввода, так и для перемещения узла. Введенные узлы можно передвинуть

на более удобные места. Узел можно удалить, щелкнув на нем правой кнопкой мыши в режиме .


При начальном вводе узлов не следует сразу стремиться улучшить внешний вид узла, лучше сначала ввести все узлы, а затем приступить к «наведению блеска» [6].


Советы по редактированию:

Для улучшения восприятия результатов расчёта режимов графическую схему потокораспределения необходимо сделать похожей на отображаемую однолинейную.

Для принудительной горизонтальной ориентации шины в режиме ввода необходимо нажать клавишу **Alt**, для вертикальной – клавишу **Shift**.

Узел также можно изобразить в виде точки. Для этого нужно **нажать на него левой кнопкой мыши** удерживая одновременно клавиши **Alt** и **Shift**.

При оптимизации программа создает на каждой ветви два излома, показанных на рисунке. Для добавления новых изломов, изменения места уже имеющихся и удаления ненужных служит режим **Излом**. 

Вместе с изломами для улучшения внешнего вида узла используется режим **Присоединение** . Такой режим нужно использовать для перемещения точки присоединения элемента (изображения нагрузки, генератора, реактора или ветви). Перемещение в этом режиме выполняется левой кнопкой мыши.

Получить более подробную информацию о применении графического интерфейса RastrWin можно в разделе Помощь/Справка.

После выполнения расчёта режимов на подготовленной графической схеме отображается информация об уровнях напряжения (в кВ), величине углов δ (в градусах) узлов, потоках активной и реактивной мощности (в МВА) и токах в ветвях (А).

Размер, шрифт, цвет и количество отображаемой информации на графической схеме можно настроить используя таблицу «Текст» в меню Дополнительно/Параметры/Текст (рисунок 8).

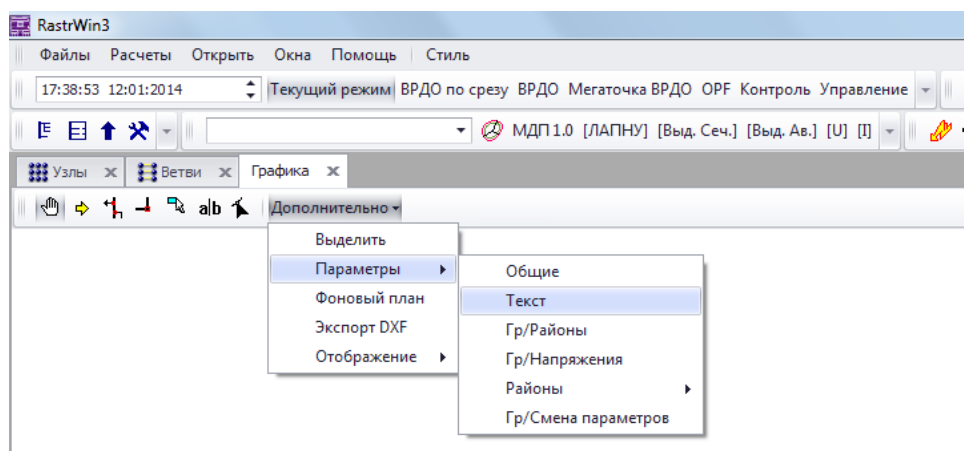


Рисунок 8 – Вызов окна для редактирования текстовых полей на графической схеме.

ПЕРЕЧЕНЬ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В РАБОТЕ

Для выполнения практической работы необходим ПК с установленной системой компьютерной математики MathCad для расчёта параметров моделей элементов ЭЭС и с установленным программным комплексом RastrWin3.

ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Составляется схема замещения электрической сети, согласно варианту задания (выделяются узлы и ветви схемы замещения).
2. Выполняется нумерация каждого узла для задания в ПВК RastrWin натуральными цифрами от 1 до 2 147 483 647.
3. Выполняется расчёт каждого из параметров схемы замещения:
 - для линий электропередачи (ЛЭП) определяются продольное сопротивление $R + jX$ и проводимость на землю B (в ПВК RastrWin ёмкостная проводимость ЛЭП задается в микросименсах со знаком **минус в таблице Ветви**;

• для каждого узла нагрузки определяется активная и реактивная мощности, приведённые к стороне ВН. В практической работе необходимо определить по формулам приведенным ниже:

$$P_n = 0,5 \cdot S_{Hmp}; \quad (2)$$

$$Q_n = P_n \cdot 0,4, \quad (3)$$

где S_{Hmp} - номинальная мощность трансформаторов на подстанции (задана в МВА на схемах приложения 1).

4. Подготовить отчет по практической работе.

ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ

В отчёт по практической работе необходимо включить: однолинейную схему моделируемой сети, схему замещения с рассчитанными параметрами, таблицы «Узлы» и «Ветви» из ПВК RastrWin с заданными параметрами, а также графическое представление электрической сети из ПВК RastrWin (схема потокораспределения). Схемы потокораспределения необходимо представить для нормального режима работы сети и для послеаварийного – отключения наиболее загруженной ветви.

ВЫВОДЫ

В результате выполнения практической работы закрепляются теоретические и навыки по расчёту параметров схем замещения элементов ЭЭС и практические навыки работы в ПВК RastrWin при выполнении расчётов электрических режимов.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.

- 1) Для каких целей задаются пределы изменения реактивной мощности (Q_{min} , Q_{max})?
- 2) Что такое балансирующий узел и зачем он задается?
- 3) Что понимаю под эквивалентированием электрической системы?
- 4) Сколько параметров схемы замещения и какие рассчитывается для ВЛ и КЛ 35 кВ?

5) Сколько параметров схемы замещения и какие рассчитывается для ВЛ и КЛ 10 кВ?

Практическая работа № 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ПВК RASTRWIN3.

Цель работы: изучение моделирования силовых трансформаторов в ПВК RastrWin.

ЗАДАНИЕ

В соответствие с вариантами, приведёнными в таблице 1:

1. Подготовить схему замещения для заданных силовых трансформаторов;
2. Рассчитать параметры схемы замещения трансформаторов.
3. Пронумеровать узлы схемы замещения.
4. Выполнить моделирование в ПВК RastrWin.
5. Подготовить графическую схему в ПВК RastrWin.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Основные возможности моделирования трансформаторов в ПВК RastrWin [6,8]:

- Расчет параметров трансформатора по паспортным данным;
- Расчет взаимосвязанного КТ;
- Расчет допустимых токов обмотки ВН, СН, общей обмотки (АТ);
- Расчет сопротивлений трансформатора в зависимости от положения анцапф;
- Расчет номинальных напряжений;
- Расчет полной БД Анцапф и возможность её редактирования;
- Графическое отображение 3х обм. трансформаторов и АТ.

Таблица 1 – Параметры трансформаторов для моделирования.

№ варианта	Марка трансформатора	Место установки устройства Регулирования напряжения	Каталожные данные											Расчетные данные								
			$U_{ном}$, обмоток, кВ			u_k , %			ΔP_K , кВт			ΔP_x , кВт	I_x , %	R_T , Ом			X_m , Ом			В, См	G, См	ΔQ , квар
			ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН			ВН	СН	НН	ВН	СН	НН			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	ТДТНЖ-25000/220	РПН в нейтрали ВН $\pm 12\%$, ПБВ $\pm 8 \times 1,5\%$ СН $\pm 2 \times 2,5\%$	230	27,5; 38,5	6,6; 11; 27,5	12,5	20		6,5	135		50	1,2	5,7	5,7	5,7	275		48	5,67	0,95	300
2	ТДТН-40000/220	РПН в нейтрали ВН $\pm 12\%$, ПБВ $\pm 8 \times 1,5\%$ СН $\pm 2 \times 2,5\%$	230	38,5	6,6; 11	12,5	22		9,5	220		55	1,1	3,6	3,6	3,6	165		25	8,32	1,04	440
3	ТДТНЖ-40000/220	РПН в нейтрали ВН $\pm 12\%$, ПБВ $\pm 8 \times 1,5\%$ СН $\pm 2 \times 2,5\%$	230	27,5; 38,5	6,6; 11; 27,5	12,5	22		9,5	240		66	1,1	3,9	3,9	3,9	165		25	8,32	1,25	440
4	АТДЦТН-63000/220/ 110	РПН в линии СН $\pm 12\%$, ± 6 ступеней	230	121	6,6; 11; 27,5; 38,5	11	35		22	215		45	0,5	1,4	1,4	2,8	104		95,6	5,95	0,85	315
5	АТДЦТН-63000/220/ 110/0,4*	РПН в линии СН $\pm 12\%$, $\pm 8 \times 1,5\%$ ПБВ 0,4 кВ $\pm 2 \times 2,5\%$	230	121	0,4	11				180		33	0,4	1,2	1,2	120	104			4,76	0,62	
6	АТДЦТН-125000/220/ 110	РПН в линии СН $\pm 12\%$, ± 6 ступеней	230	121	6,6; 11; 38,5	11 / 11	31 / 45		19 / 28	290 / 305		85 / 65	0,5	0,5 / 0,52	0,5 / 0,52	1,0 / 3,2	48,6 / 49,0		2,5 / 131	11,8 / 2	1,61	625
7	ТДЦ-80000/220	ПБВ на стороне ВН $\pm 2 \times 2,5\%$	242		6,3; 10,5; 13,8		11			320		105	0,6	2,9			80,5			8,2	1,79	480
8	ТРДЦН-100000/220	РПН в нейтрали ВН $\pm 12\%$	230		20-20		17			460		70	0,5	2,4			90			9,45	1,32	500
9	ТДЦ-125000/220	ПБВ на стороне ВН $\pm 2 \times 2,5\%$	242		10,5; 13,8; 15,75		11			380		135	0,5	1,4			51,5			10,6 / 7	2,31	625

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
10	ТРДЦН-160000/220	РПН в нейтрали ВН ±12%,	230		38,5*; 11-11		13,5			525		167	0,6	1,08			44,9			18,1 4	3,16	960
11	ТДЦ (Ц) - 200000/220	ПБВ на стороне ВН ±2х2,5%	242		13,8; 15,75; 18		11			580		200	0,45	0,77			32,2			15,3 6	3,42	900
12	ТДТН-25000/220	РПН в нейтрали ВН ± 12%, 12 ступеней ПБВ СН ±2х2,5%	230	38,5	6,6; 11	12,5	20		6,5	135		50	1,2	5,7	5,7	5,7	275		148	5,67	0,95	300
13	АТДЦТН-200000/220/110	РПН в линии СН ±12%, ± 6х 2 ступеней	230	121	6,6; 11;38,5	11	32		20	430		125	0,5	0,3	0,3	0,6	30,4		54,2	18,9	2,36	1000
14	АТДЦТН-200000/220/110 (Мощность обмотки НН 80 и 100 МВА) МЭЗ	РПН в линии СН ±12%, ± 6 ступеней	230	121	38,5;6, 3;6,6 10,5;	11	32		20	330		80	0,24	0,2	0,2	0,5 0,4	30,4		54,2	9,07	1,51	480
15	АТДЦТН-250000/220/110	РПН в линии СН ±12%, ± 6 ступеней	230	121	6,6; 10,5; 11	11	33,4		20,8	520		145	0,5	0,2	0,2	0,4	25,5		45,1	23,6 3	2,74	1250
16	ТРДНС-40000/330	РПН в нейтрали ВН ± 12%, 12 ступеней	330		6,3- 6,3;6,3 -10,5; 10,5-		11			180		80	1,4	12,3			229			5,14	0,73	560
17	ТРДЦН-63000/330	РПН в нейтрали ВН ±12%, ±12 ступеней	330		6,3- 6,3; 6,3- 10,5;		11			265		120	0,7	7,3			190			4,05	1,01	441
18	ТРДН-32000/220		230		6,3- 6,3; 6,6-6,6		11,5			150		45	0,65	7,7			190,5			3,93	0,85	280
19	ТРДНС-40000/220		30		11- 11;11- 6,3		11,5			170		50	0,9	5,6			152,4			6,81	0,95	360

Схемы замещения трансформаторов и порядок расчёта их параметров приведены в [1, 5, 7, 16 и др].

Для моделирования двухобмоточных трансформаторов в RastrWin 3, необходимо определить и занести в таблицу Ветви следующие параметры:

- Сопротивление $R + jX$, приведенное к стороне высокого напряжения,
- Проводимость шунта на землю $G + jB$
- Коэффициент трансформации, равный отношению:

$$K_m = \frac{U_{нн}}{U_{вн}}, \quad (4)$$

где $U_{нн}$ - низшее номинальное напряжение трансформатора (по справочнику);

$U_{вн}$ - высшее номинальное напряжение трансформатора (по справочнику);.

Таким образом, коэффициент трансформации будет меньше единицы.

Пример заполнения таблицы Ветви при моделировании двухобмоточного трансформатора 35/6 мощностью 6,3МВА представлен на рисунке 9.

№	О	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	I...	Название	R	X	B	G	Kт/г
1	<input type="checkbox"/>		Тр-р	35	36			Тавричанка 35 кВ - Тавричанка 6 кВ	0,70	7,30	92,6	7,5	0,171

Рисунок 9– Пример заполнения таблицы Ветви.

Далее на основе составленной расчетной схемы осуществляется подготовка графической схемы двухобмоточного трансформатора (Рисунок 10).

Для моделирования автотрансформаторов и трехобмоточных трансформаторов необходимо заполнить таблицы «Узлы», «Ветви», «Транс.Паспорт», «Трансформаторы».

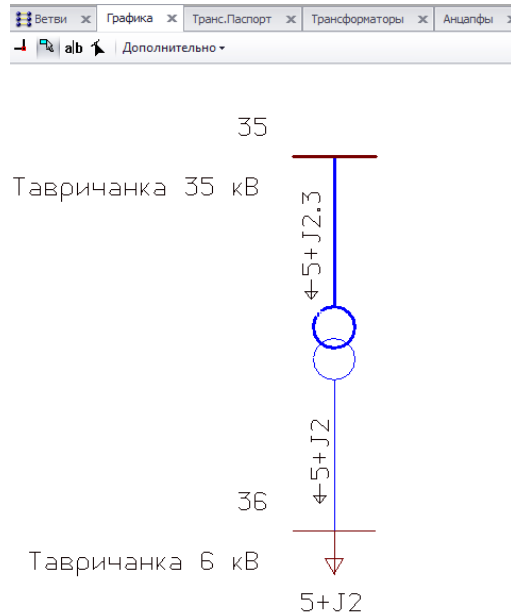


Рисунок 10– Графическое представление двухобмоточного трансформатора RastrWin 3.

Наиболее простым способом моделирования трёхобмоточных трансформаторов является задание его тремя ветвями в таблице Ветви. Для этого необходимо представить трансформатор по схеме трёхлучевой звезды, то есть задать три ветви для каждой из которой необходимо определить и занести в таблицу «Ветви» следующие параметры:

- Сопротивление $R + jX$, приведенное к стороне высокого напряжения;
- Проводимость шунта на землю $G + jB$ (только для стороны ВН);
- Коэффициент трансформации.

Пример заполнения таблицы Ветви при моделировании трёхобмоточного трансформатора 110/35/6 мощностью 40 МВА представлен на рисунке 11.

O	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	I...	Название	R	X	B	Kт/г	N_анц	БД...	P_нач	Q_нач	Na
1	<input type="checkbox"/>	Тр-р	1	2			Западная 1 110 кВ - Западная 1Н	0,83	35,53	17,9	1,000			-33	-19	
2	<input type="checkbox"/>	Тр-р	2	3			Западная 1Н - Западная 135 кВ	0,83			0,326			-13	-6	
3	<input type="checkbox"/>	Тр-р	2	4			Западная 1Н - Западная 16 кВ	0,83	20,65		0,057			-20	-9	

Рисунок 11– Пример заполнения таблицы Ветви.

Для уточнения расчётной модели в RastrWin 3 предусмотрена функция дополнительного расчёта параметров трансформаторов по паспортным данным.

Для этого необходимо открыть таблицу **Открыть - Трансформаторы – Трансформаторы** – рисунок 12.

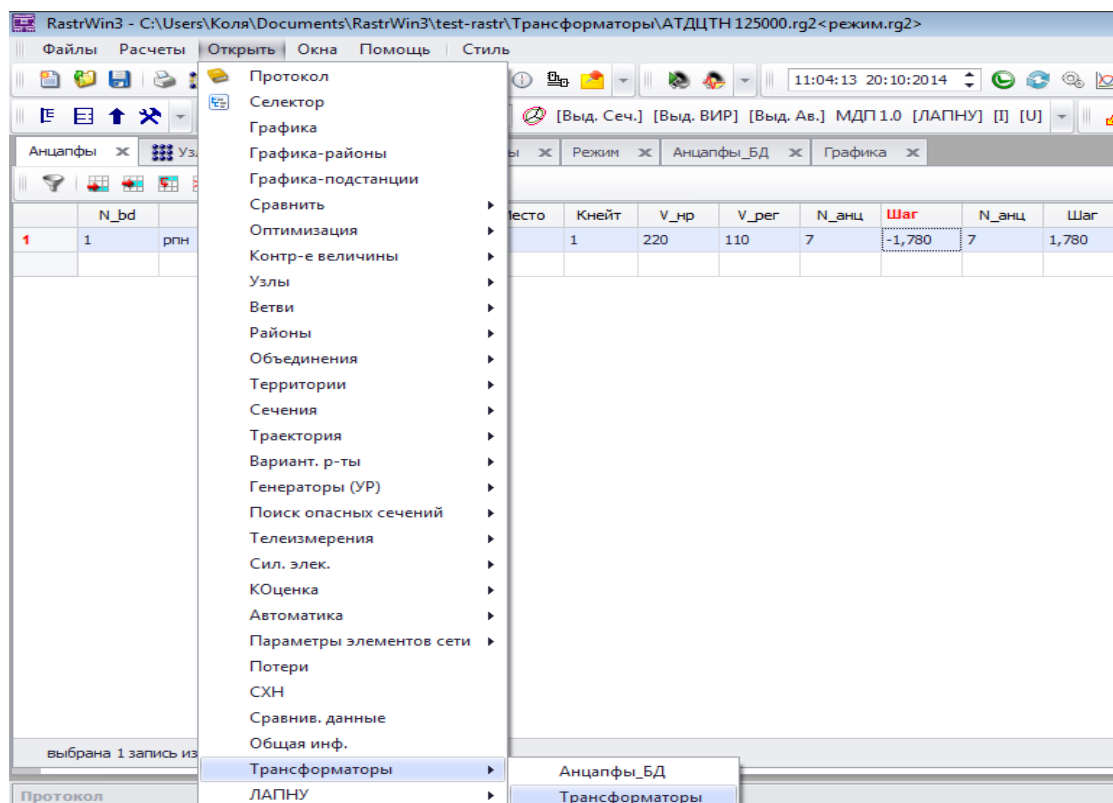


Рисунок 12– Открытие таблицы «Трансформаторы».

Таблица «Трансформаторы» предназначена для моделирования трехобмоточных и автотрансформаторов, и позволяет рассчитывать сопротивления трансформаторов по их паспортным данным, устанавливать на один трансформатор несколько устройств регулирования типа ПБВ, РПН, ВДТ и рассчитывать взаимосвязный комплексный коэффициент трансформации. Кроме того, пересчитывается сопротивление и допустимые токи трансформатора в зависимости от положений анцапф [6].

В таблице «Трансформаторы» имеются следующие поля для заполнения[6]:

N_bd- Номер (обязательное поле);

Название - название трансформатора (необязательное поле);

Тип - Тип трансформатора (Трехобмоточный трансформатор, Автотрансформатор) – (обязательное поле);

S – состояние генератора (включен/отключен) (обязательное поле);

N_B, N_C, N_H, N₀- номера узлов на высокой/средней/низкой сторонах и номер узла нейтрали соответственно (обязательное поле);

U_B, U_C, U_H - Номинальные напряжения сторон. (обязательное поле);

U_k_{BC}, U_k_{BH}, U_k_{CH} - напряжение КЗ между обмотками ВН-СН, ВН-НН, СН-НН соответственно, отнесенные к номинальной мощности (авто)трансформатора S_{ном}, % номинального напряжения; (обязательное поле);

dP_{кз}(В-С), dP_{кз}(В-Н), dP_{кз}(С-Н) - потери КЗ между обмотками ВН-СН, ВН-НН, СН-НН соответственно (обязательное поле);

dP_{xx}- потери холостого хода (потери в стали) трех фаз трансформатора(обязательное поле);

I_{xx} - ток холостого хода трансформатора, % номинального тока. (обязательное поле);

I_{допВН}, I_{допСН}, I_{допОО} - допустимые токи высокой/средней/общей обмоток соответственно(обязательное поле)

I_{ВН}, I_{СН}, I_о – токи на ВН,СН и общей обмотки для АТ соответственно(поле заполняется автоматически при расчете режима);.

N_{ПБВ}, N_{РПН}, N_{ВДТ} - ссылка в таблицу «Анцапфы» на устройство регулирования(обязательное поле);

N_{Xt} - ссылка в таблицу «Анцапфы БД» на коэффициент трансформации. Если это поле задано указанные устройства регулирования типа ПБВ, РПН, ВДТ игнорируются (обязательное поле);.

анц_{ПБВ}, анц_{РПН}, анц_{ВДТ} - номера анцапф соответствующих устройств регулирования (обязательное поле);

мин U_k_{В-С}, макс U_k_{В-С} - значения U_k В-С на крайних положениях устройств РПН (используется для пересчета сопротивлений от номера анцапфы РПН) (обязательное поле);

Пример занесения информации по двух и трехобмоточному трансформатору в соответствующей таблице (Трансформаторы – Трансформаторы) показан на рисунке 13.

	N	Название	Тип	S	N_B	N_C	N_H	N_O	N_пар	N_I(t)	Tс	I_донВН	I_ВН	I_донСН	I_СН	I_донОО	I_оо	...
1	1	ТДТН-40000/110	3х-обм	1	3	4	2						189,5		226,7			
2	3	ТМН-6300/110	2х-обм	13		14												

Рисунок 13 – Таблица «Трансформаторы».

Далее для автоматического расчета параметров трансформаторов необходимо включить опцию «Расчеты-Параметры-Режим-Пересчет АТ/3х обм. трансформаторов» - рисунок 14.

Название	
Точность расчета (dP)	
Максимальное число итераций (It)	
Стартовый алгоритм (Start)	Да
Плоский старт (Пл. старт)	Нет
Макс. допустимое снижение V (dV-)	
Макс. допустимое превышение V (dV+)	
Макс. допустимый угол по связи (dDelta)	
Состояние расчета режима (Статус)	Нормально
Учет частоты : (W)	Нет
Отклонение частоты (dF)	
Пересчитывать P/Q узла по P ген (Ген->P)	Да
Метод Расчета (Метод)	Ньютон
Метод учета ограничений Q (Метод учета ограничений Q)	Стандарт
Уровень печати (Печать)	Мин
Точный метод расчета Qmax (Qmax)	Нет
Сопротивление выключателя (оe на 10-6) (Min_X)	
Пересчет АТ/3х обм. трансформаторов (Транс.)	Да

Рисунок 14 – Опция Пересчет АТ/3х обм. Трансформаторов.

Далее на основе составленной расчетной схемы осуществляется подготовка графической схемы трехобмоточного трансформатора (Рисунок 15).

Автотрансформаторы моделируются аналогично трёхобмоточным трансформаторам, только в столбце тип (рисунок 13) выбирается АТ.

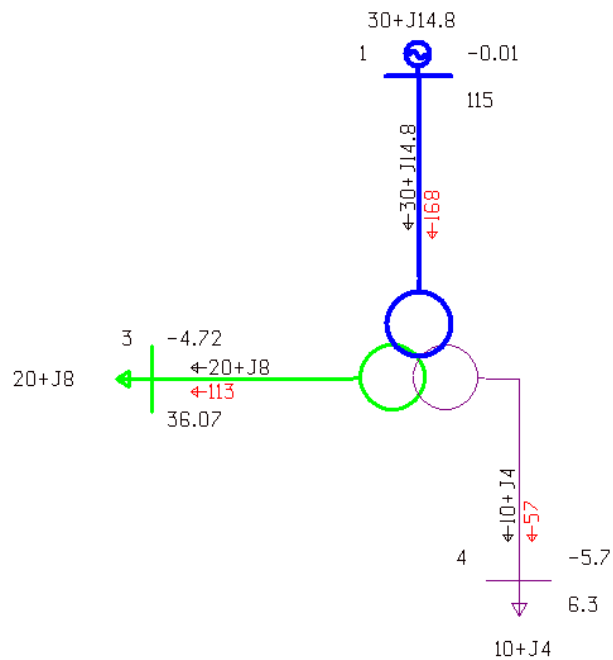


Рисунок 15– Графическое представление трехобмоточного трансформатора RastrWin 3.

ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ.

1 Составляется Г-образная схема замещения для двухобмоточного и трехлучевая схема замещения трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора, согласно варианту задания. Узлы схемы замещения нумеруются. Шины ВН трансформатора принимаются за балансирующий узел.

2 По справочным данным определяются сопротивления $R + jX$ для каждой из обмоток трансформаторов, проводимости шунта на землю $G + jB$ и коэффициенты трансформации каждой ветви

3 В ПВК RastrWin заполнить таблицы **Узлы**, **Ветви** для моделируемых трансформаторов.

Нагрузки узлов СН и НН для трёхобмоточных и автотрансформаторов определить по формулам:

$$P_n = 0,25 \cdot S_{Hmp}; \quad (5)$$

$$Q_n = P_n \cdot 0,4, \quad (6)$$

где S_{Hmp} номинальная мощность трансформаторов.

Для двухобмоточных трансформаторов нагрузку на шинах НН задать из условия 50% загрузки моделируемого трансформатора

- 4 Оформить Графику для участка сети.
- 5 Сохранить результаты расчёта по шаблонам *.rg2, *.grf, *.trn.
- 6 Подготовить отчет по практической работе.

ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ

В отчёте по практической работе необходимо представить схему замещения с рассчитанными параметрами, таблицы «Узлы», «Ветви», «Трансформаторы», «Анцпфы_БД» из ПВК RastrWin с заданными параметрами, и графическое представление электрической сети (схему потокораспределения).

ВЫВОДЫ

В результате выполнения практической работы закрепляются теоретические и навыки по расчёту параметров схем замещения трансформаторов и практические навыки работы в ПВК RastrWin при моделировании всех типов трансформаторов.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.

1. Какие параметры необходимы для моделирования трансформаторов в ПВК RastrWin?
2. Какие типы трансформаторов позволяет моделировать ПВК RastrWin?
3. Какие основные возможности моделирования трансформаторов в ПВК RastrWin?

Практическая работа № 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПВК RASTRWIN.

Цель работы: изучение способов моделирования устройств регулирования напряжения в ПВК RastrWin.

ЗАДАНИЕ:

1. Спроектировать однолинейную схему электрической сети структурная схема которой приведена на рисунке 16. Параметры трансформаторов взять из таблицы 1, напряжение ЛЭП принять по напряжению ВН трансформаторов, количество цепей ЛЭП и её протяжённость приведены в таблице 2, сечение ЛЭП выбрать самостоятельно по экономическим токовым интервалам [12, 14], нагрузки НН и СН приёмной ПС рассчитать выражениям (7) и (8). Параметры трансформаторов питающей станции выбрать самостоятельно.

2. Подготовить схему замещения спроектированной сети.

3. Пронумеровать узлы схемы замещения. Шины генераторного напряжения станции принять за балансирующий узел.

4. Занести параметры сети в RastrWin, подготовить схему потокораспределения.

5. Выполнить моделирование устройств регулирования (РПН, ПБВ, ВДТ) в ПВК RastrWin согласно параметрам трансформаторов, установленных на ПС. Выполнить расчёты режимов при крайних положениях регуляторов напряжения на ПС и определить опытным путём положение устройств регулирования напряжения для обеспечения закона встречного регулирования на шинах НН ПС.

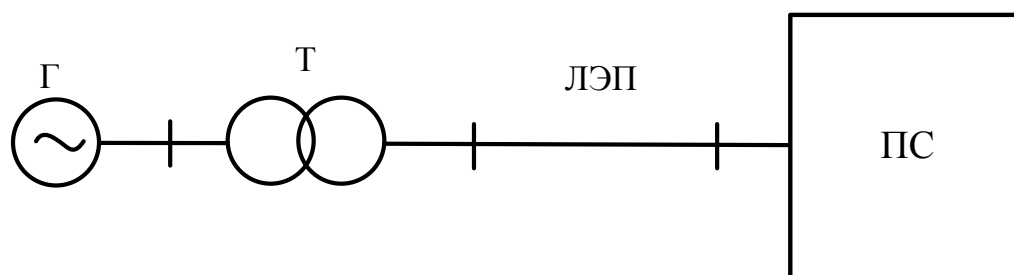


Рисунок 16– Схема для выполнения работы.

Таблица 2 – Параметры ЛЭП.

Номер варианта	Длина ЛЭП	Количество цепей ЛЭП
1	54	1
2	23	1
3	24	1
4	85	1
5	75	2
6	56	2
7	45	2
8	14	2
9	25	1
10	70	1
11	25	1
12	50	1
13	40	2
14	20	2
15	40	2
16	10	2
17	35	1
18	45	1
19	47	1

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Напряжение в узлах сети постоянно меняется из-за изменения нагрузки, режима работы источников питания, схемы сети.

Регулированием напряжения называется процесс изменения напряжения в характерных точках сети с помощью специальных технических средств. Способы регулирования напряжения возникли с возникновением электрических сетей. Их развитие происходило от низших уровней управления к высшим. Сначала

использовалось регулирование напряжения в центрах питания распределительных сетей и непосредственно у потребителей и на энергоблоках электростанций. Сейчас эти методы регулирования напряжения называются локальными. По мере развития сетей и объединения их в крупные энергосистемы возникла необходимость координировать работу локальных методов. Координация относится к высшим уровням регулирования напряжения [7].

Локальное регулирование может быть централизованным и местным. Централизованное управление выполняется в центрах питания. Местное регулирование проводится непосредственно у потребителей. Регулирование напряжения в центрах питания приводит к изменению режима напряжения во всей сети, которая питается от него. Местное регулирование приводит к изменению режима напряжения в ограниченной части сети.

Регулирование напряжения в ЭЭС можно осуществлять, изменяя [1,5]:

- а) напряжение генераторов электростанций;
- б) коэффициенты трансформации трансформаторов и автотрансформаторов;
- в) параметры питающей сети;
- г) величину реактивной мощности, протекающей по сети.

Применением перечисленных способов обеспечивается централизованное регулирование напряжения, однако последние три из них могут быть применены и для местного регулирования.

Регулирование напряжения на электростанциях

На электростанциях регулирование напряжения производится на генераторах и повышающих трансформаторах.

Изменение напряжения генераторов возможно за счет регулирования тока возбуждения. Не меняя активную мощность генератора напряжение можно изменять в пределах $\pm 5\%$. Повышение напряжения на 5% сверх номинального сопровождается увеличением потерь в стали и повышением ее нагрева. При снижении напряжения до $0,95 U_{ном}$ номинальный ток статора возрастает на 5% и соответственно увеличивается нагрев обмотки. [7]

На каждой ступени трансформации теряется приблизительно 5-10 % напряжения. Поэтому регулировочного диапазона генераторов явно недостаточно, чтобы поддерживать необходимый уровень напряжения в сети. Кроме того, трудно согласовать требования к регулированию напряжения у близких и удаленных электроприемников. Поэтому генераторы электростанций являются вспомогательным средством регулирования напряжения. Как единственное средство регулирования генераторы применяются только для простейшей системы: электростанция – нераспределенная нагрузка. В этом случае на шинах электростанций осуществляется встречное регулирование напряжения. Изменением тока возбуждения повышают напряжение в часы максимальной нагрузки и снижают в период минимальной нагрузки.

Изменение напряжения на шинах генератора или электрической станции возможно путём задания напряжения в генераторном узле, заданном моделью $P, U = \text{const}$.

В ПВК RastrWin генератор автоматически определяется программой при задании в параметрах узла: генерации активной мощности (P_g), заданного напряжения ($V_{зд}$) и пределов по реактивной мощности генератора (Q_{\min} и Q_{\max}). При этом возможность потребления реактивной мощности задаётся в столбце Q_{\min} со знаком «-», а предельная возможность выработки реактивной мощности Q_{\max} задаётся со знаком «+».

Регулирование напряжения на понижающих подстанциях

Для регулирования напряжения трансформаторами подстанций предусмотрена возможность изменять коэффициент трансформации в пределах 10 – 20 %. По конструктивному исполнению различают два типа переключающих устройств:

- с регулированием без возбуждения (ПБВ), то есть для изменения коэффициента трансформации трансформатор отключают от сети;
- с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН).

Устройство РПН дороже устройства ПБВ. Стоимость устройства мало зависит от мощности трансформатора. Поэтому относительное удорожание трансформатора с РПН будет значительно большим для трансформаторов меньшей мощности. В связи с этим трансформаторы напряжением 6 – 20 кВ большей частью выполняются с ПБВ, а трансформаторы напряжением выше 35 кВ с РПН [12].

Устройство РПН, как правило, устанавливают на обмотке высшего напряжения по следующим причинам:

- на стороне высшего напряжения меньшие токи, поэтому устройство имеет меньшие габариты;
- обмотка высшего напряжения имеет большее количество витков, поэтому точность регулирования выше;
- по конструктивному исполнению обмотка высшего напряжения является наружной (магнитопровод – обмотка низшего напряжения – обмотка высшего напряжения). Поэтому ревизию устройства РПН выполнять проще;
- устройство РПН располагают в нейтрали высшей обмотки. Обмотки высшего напряжения соединяются в звезду, а обмотки низшего напряжения соединяются в треугольник. Трехфазное регулирование проще выполнить на обмотках, соединенных в звезду.

Необходимые уровни напряжения в сети не всегда можно обеспечить с помощью только одних трансформаторов и АТ со встроенным регулированием напряжения. В тех случаях, когда электроснабжение осуществляется одновременно от обмоток АТ СН и НН, бывает необходимо осуществлять регулирование напряжения в сетях обоих напряжений. Для этой цели служат линейные регулировочные трансформаторы. Их установка также позволяет осуществить регулирование без замены ранее установленных нерегулируемых трансформаторов. [12]

Устройства регулирования напряжения должны обеспечивать поддержание напряжения на шинах напряжением 3-20 кВ электростанций и подстанций, к

которым присоединены распределительные сети, в пределах не ниже 105 % номинального в период наибольших нагрузок и не выше 100% номинального в период наименьших нагрузок этих сетей. Отклонения от указанных уровней напряжения должны быть обоснованы [9].

Задание устройств регулирования напряжения трансформаторов в RastrWin

При моделировании устройств регулирования напряжения трансформаторов в *RastrWin3* необходимо заполнить дополнительную таблицу (анцапфы) сохранить её отдельным шаблоном (*.anc) и создать в таблице Ветви ссылки на подготовленные модели устройств регулирования напряжения.

Чтобы открыть таблицу нужно выбрать меню Открыть–Оптимизация–Анцапфы (Рисунок 17).

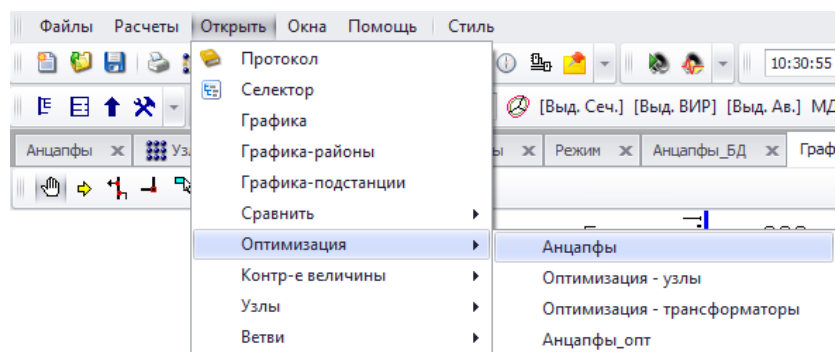


Рисунок 17– Выбор таблицы Анцапфы.

В таблице «Анцапфы» необходимо задать следующие параметры [6]:

Nbd – номер типа регулирования трансформатора в базе данных;

Названия– его название (необязательно);

ЕИ – единицы измерения шага отпаек (% или кВ). Если это поле не заполнено, предполагаются %, если в это поле занести любой символ, отличный от % и пробела, будут предполагаться кВ;

+/- – порядок нумерации анцапф: «+» – анцапфы нумеруются, начиная от максимальной положительной добавки, «-» – от максимальной отрицательной (по умолчанию задается «+»);

Тип– тип регулирования. В растре при моделировании трехобмоточных и авто трансформаторов можно установить 3 устройства регулирования РПН, ПБВ, ВДТ.

Место-Регулирующие устройства могут устанавливаться на стороны ВН и СН, а так же в нейтраль АТ. От него зависит по каким формулам будет рассчитываться коэффициент трансформации и допустимые токи обмоток.

Кнейтр – число анцапф в нейтральном положении (с нулевой добавкой), по умолчанию 1;

V(nr) – напряжение нерегулируемой ступени;

V(per) – напряжение регулируемой ступени;

Nanc – число анцапф с шагом, заданным в следующей колонке;

Шаг – величина шага (% или кВ в зависимости от поля ЕИ).Порядок следования пар Nанц – Шаг – от наибольшего минуса к наибольшему плюсу.

Пример заполнения таблицы Анцапфы для устройства РПН, установленного в линии СН АТ 63000/220 с диапазонами регулирования $\pm 6 \times 2\%$ приведён на рисунке 18.

	N_bd	Названия	ЕИ	+/-	Тип	Место	K...	V_nr	V_per	N_анц	Шаг	N_анц	Шаг	N_анц	Шаг
1	1	рпн	%	+	РПН	СН	1	220	110	6	-2,000	6	2,000		

Рисунок 18 – Пример заполнения таблицы Анцапфы.

После задания таблицы Анцапфы в таблице Ветви выполняется ссылка на номер строки в базе данных анцапф. Пример приведен на рисунке 19.

После выполнения такой ссылки изменение номера отпайки РПН (N_анц) приводит к пересчёту коэффициента трансформатора ветви.

Изменением положения отпаяк РПН добиваются заданного напряжения на шинах СН или НН ПС.

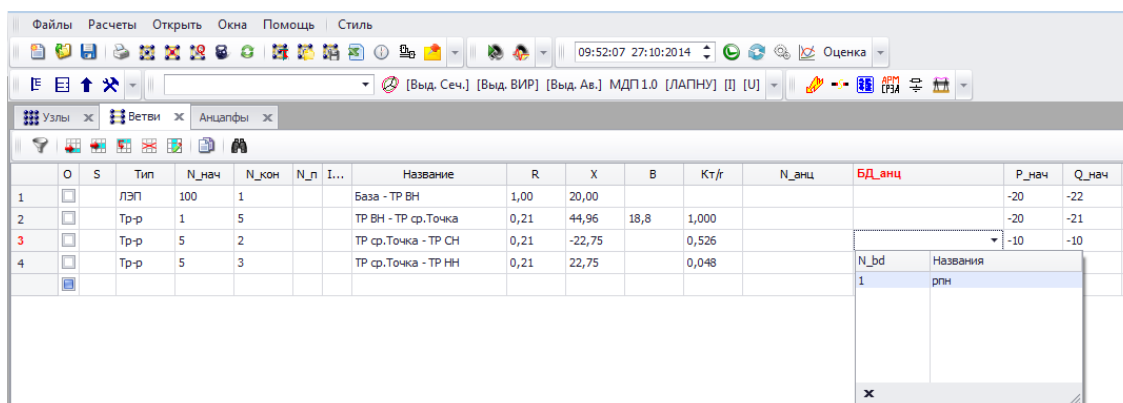


Рисунок 19

- Выполнение ссылки в таблице Ветви на номер базы данных анцапф.

Для уточнения расчётной модели - изменения допустимого тока трансформатора от положения анцапфы заполнится таблица «Анцапфы_БД» для всех возможных сочетаний анцапф. Для этого открывается таблица Открыть-Трансформаторы - Анцапфы_БД– рисунок 20.

Номер	Анц. РПН	Анц. ВДТ	Анц. ПВД	X_ВН	X_СН	X_НН	R_ВН	R_СН	R_НН	I доп. ВН	I доп. СН	I доп. ОО	Ктр веш. ВС	Ктр миним. ВС	Ктр веш. ВН
1	1			43,9	-23,8	23,8	0,21	0,21	0,21	314,0	536,1	222,1	0,58568		0,04783
2	1	2		44,0	-23,7	23,7	0,21	0,21	0,21	314,0	544,0	230,0	0,57717		0,04783
3	1	3		44,2	-23,6	23,6	0,21	0,21	0,21	314,0	552,2	238,2	0,56865		0,04783
4	1	4		44,3	-23,4	23,4	0,21	0,21	0,21	314,0	560,6	246,6	0,56014		0,04783
5	1	5		44,4	-23,3	23,3	0,21	0,21	0,21	314,0	569,2	255,2	0,55163		0,04783
6	1	6		44,6	-23,1	23,1	0,21	0,21	0,21	314,0	578,1	264,1	0,54311		0,04783
7	1	7		44,8	-22,9	22,9	0,21	0,21	0,21	314,0	587,4	273,4	0,53460		0,04783
8	1	8		45,0	-22,7	22,7	0,21	0,21	0,21	314,0	596,9	282,9	0,52609		0,04783
9	1	9		45,2	-22,6	22,6	0,21	0,21	0,21	314,0	606,7	292,7	0,51757		0,04783
10	1	10		45,4	-22,3	22,3	0,21	0,21	0,21	314,0	616,8	302,8	0,50906		0,04783
11	1	11		45,6	-22,1	22,1	0,21	0,21	0,21	314,0	627,3	313,3	0,50055		0,04783
12	1	12		45,8	-21,9	21,9	0,21	0,21	0,21	314,0	638,2	324,2	0,49203		0,04783
13	1	13		46,0	-21,7	21,7	0,21	0,21	0,21	314,0	649,4	335,4	0,48352		0,04783
14	1	14		46,3	-21,4	21,4	0,21	0,21	0,21	314,0	661,0	347,0	0,47501		0,04783
15	1	15		46,6	-21,2	21,2	0,21	0,21	0,21	314,0	673,1	359,1	0,46650		0,04783

Рисунок 20 - Таблица «Анцапфы_БД».

В таблице «Анцапфы_БД» при включенной опции «Пересчет АТ/Зх обм. Трансформаторов (Транс.) в меню Расчёты/параметры/Режим при каждом расчете режима пересчитываются все значения допустимых токов. Единожды сформировав данную таблицу, пользователь может отключить опцию пересчета трансформаторов и вручную изменить необходимые параметры, тогда при расчете режима в таблицу «Ветви» попадут уже не рассчитанные, а выставленные пользователем значения[6].

Если диапазона регулирования трансформаторов не хватает регулирование напряжение может быть выполнено с помощью КРМ [4,5].

Устройства компенсации реактивной мощности

Устройства компенсации реактивной мощности предназначены для выполнения задачи обеспечения качества электрической энергии по напряжению путем поддержания заданных уровней напряжения в контрольных точках сети. В определенных случаях, особенно для межсистемных и системообразующих связей, при дальнем транспорте электроэнергии к этим устройствам предъявляются также требования в отношении обеспечения заданных пределов статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем, устойчивости нагрузки.

В RastrWin3 возможно можно моделировать несколько типов устройств компенсации реактивной мощности:

- БСК (задаются в таблице Узлы шунтом $V_{ш}$ со знаком $-$);
- ШР (задаются в таблице Узлы шунтом $V_{ш}$ со знаком $+$);
- СК (задаются в таблице Узлы аналогично генераторам).
- Управляемые шунтирующие реакторы (УШР);
- Статические тиристорные компенсаторы (СТК);
- Статические компенсаторы реактивной мощности –СТАТКОМ.

При моделировании традиционных БСК и УШР рассчитывается шунт устройства и заносится в таблице Узлы (в микросименсах) в строке соответствующей месту установки этого устройства.

Для моделирования синхронных компенсаторов в узле необходимо задать $V_{зд}$, а так же пределы изменения реактивной мощности (Q_{min} , Q_{max}). Графа $P_{г}$ при этом не заполняется.

Для моделирования специальных устройств компенсации реактивной мощности необходимо открыть таблицу **Открыть – Сил. Элек. – УШР/СТК** – рисунок 21.

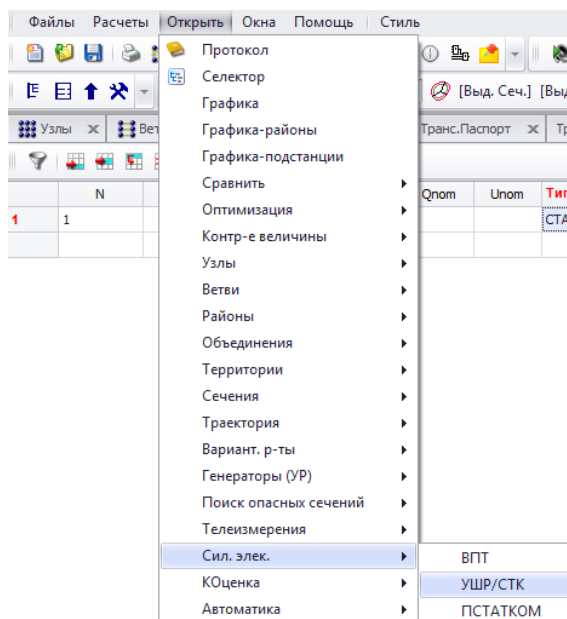


Рисунок 21 - Таблица «УШР/СТК».

В таблице «УШР/СТК» необходимо задать следующие параметры (параметры для УШР и СТК задаются одинаково) [6]:

N – номер устройства (уникальный идентификатор);

Название – название;

S – состояние (вкл/выкл);

N_узла – номер узла, к которому подключено устройство;

Тип – УШР/СТК или СТАТКОМ;

Snom – номинальная мощность

(**Qном**); **Uном** – номинальное напряжение;

Туст1 – тип уставки;

V – напряжение;

Q – реактивная мощность;

I – ток;

Трег – единицы измерения диапазонов регулирования (% – от **Snom**, **Q**, **V** (мксим + ин- дуктивный), **X**, **I** (+ индуктивный));

Мин – Мах – диапазоны регулирования (вне зависимости от задания единиц измерения пределов регулирования внутри программы используются пересчитанные эквивалентные проводимости ($V_{\min} - V_{\max}$));

Кст – статизм (%) (используется при задании уставки по напряжению). Статизм должен быть ненулевым (обычно 5–10%).

Для СТАТКОМ задается:

Тип – СТАТКОМ;

Мин – Мах – диапазоны регулирования (вне зависимости от задания единиц измерения пределов регулирования внутри программы используются эквивалентные токи ($I_{\min} - I_{\max}$));

Xsh – сопротивление СТАТКОМ (используется только для расчета внутренней эдс);

Vрасч, Dрасч – расчетная эдс за сопротивлением Xsh. Таким образом, СТАТКОМ отличается от УШР/СТК только поведением на пределах регулирования.

Порядок моделирования этих устройств необходимо изучить самостоятельно.

ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проектируется часть ЭЭС. На шинах СН и НН моделируемой ПС задаются активные и реактивные мощности, определённые по формулам:

$$P_n = 0,3 \cdot S_{\text{Тмп}}; \quad (7)$$

$$Q_n = P_n \cdot 0,4, \quad (8)$$

где $S_{\text{Тмп}}$ номинальная мощность трансформаторов.

2. Составляется схема замещения спроектированной электрической сети, согласно варианту задания.

3. Определяются параметры схем замещения.

4. Создаётся модель для расчёта установившихся режимов в ПВК RastrWin3.

5. Моделируются устройства регулирования напряжения для трансформаторов и проверяется их достаточность в нормальном и послеаварийном режиме (отключение одного из двух трансформаторов с сохранение нагрузки на втором).

6. Если отклонения напряжений на шинах НН ПС выходят за допустимые пределы необходимо добавить устройства КРМ для их нормализации.

ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ

В отчёте по практической работенеобходимо представить схему замещения с рассчитанными параметрами, таблицы «Узлы» «Ветви», «Трансформаторы», «Анцапфы_БД» «УШР/СТК» из ПВК RastrWin с заданными параметрами и графическое представление электрической сети из ПВК RastrWin (схема потокораспределения).

ВЫВОДЫ

В результате выполнения практической работызакрепляются навыки по моделированию различных устройств регулирования напряжения в ПВК RastrWin.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

1. Какими способами возможно осуществлять регулирование напряжения в ЭЭС?
2. Какие устройства регулирования напряжения позволяет моделировать ПВК *RastrWin3*?
3. Какие устройства компенсации реактивной мощности возможно моделировать в *RastrWin3*?
4. Опишите принцип встречного регулирования.

Практическая работа № 4

РАСЧЁТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НЕСКОЛЬКИХ КЛАССОВ НОМИНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПВК RASTRWIN.

Цель работы: расчёт установившегося режима электрической сети нескольких классов номинального напряжения в ПВК RastrWin.

ЗАДАНИЕ

Для схемы электрической сети приведённой в приложении 2, согласно варианту задания:

1. Составить схему замещения. Рассчитать параметры схемы замещения.
2. Составить модель для расчётов установившихся режимов в ПВК RastrWin.

Нагрузки рассчитать самостоятельно.

3. Оформить графическую схему потокораспределения расчёта установившегося режима в ПВК RastrWin.

4. Выполнить расчёт нормального режима. Напряжения на шинах низкого напряжения отрегулировать согласно закону встречного регулирования.

5. Отключить наиболее загруженный элемент сети (линию или трансформатор), оценить загрузку оборудования в послеаварийном режиме, определить мероприятия, необходимые для ввода режима в допустимую область.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Режимом работы ЭС называется ее состояние, определяемое значениями мощностей, напряжений, токов, частоты, характеризующих процесс производства, преобразования, передачи и распределения энергии и называемых параметрами режима.

Целью электрического расчета сети является определение параметров режимов, выявление возможностей дальнейшего повышения экономичности работы сети и получение необходимых данных для решения вопросов регулирования напряжения.

В зависимости от состояния электрической сети и генерирующего оборудования среди установившихся режимов принято выделять [11,12]: *нормальные режимы, ремонтные режимы, утяжеленные (ухудшенные) режимы, послеаварийные режимы.*

В электрический расчет входят распределение активных и реактивных мощностей по линиям сети, вычисление потерь активной и реактивной мощностей в сети, а также расчет напряжений на шинах потребительских подстанций в основных нормальных и послеаварийных режимах работы.

Согласно п. 5.31 [11] при выполнении расчетов установившихся режимов решаются следующие задачи:

- проверка работоспособности сети для рассматриваемого расчетного уровня электропотребления;
- выбор схем и параметров сети;
- проверка соответствия рекомендуемой схемы сети требованиям надежности электроснабжения;
- проверка выполнения требований к уровням напряжений и выбор средств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности;
- разработка экономически обоснованных мероприятий по снижению потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях;
- разработка мероприятий по повышению пропускной способности.

В ПВК RastrWin при задании модели сети все узлы разделяются на нагрузочные (Нагр), генерирующие (Ген) и балансирующие (База). В данной практической работе определить тип каждого узла и его модель студенты должны определить самостоятельно с условием, что в схеме должен быть **только один** балансирующий узел.

Согласно методических рекомендаций по проектированию энергосистем [11] при отсутствии исходных данных о параметрах установившихся режимов следует опираться на следующие положения:

1. в питающих пунктах сети наибольшие расчетные напряжения при отсутствии более точных данных рекомендуется принимать ниже максимальных рабочих: на 1 % для сетей 500 кВ и выше и на 2,5 % для сетей 330 кВ и ниже;

2. расчетные напряжения на шинах генераторов электростанций в режиме максимума нагрузки принимаются не выше 1,1 номинального напряжения;

3. на шинах ВН подстанций в режиме максимума нагрузок рекомендуются такие уровни напряжения, при которых на вторичной стороне трансформаторов с учетом использования РПН напряжение не будет ниже 1,05 номинального в нормальных и не ниже номинального в послеаварийных режимах;

4. в режиме минимума нагрузки напряжение на шинах ВН подстанций 35 - 220 кВ, как правило, не должно превышать более чем на 5 % номинальное напряжение сети. Более высокое напряжение на стороне ВН трансформаторов допускается при условии, что на шинах 6 - 10 кВ не будет превышено номинальное;

5. в расчетах электрических сетей 35 - 220 кВ напряжение на шинах СН и НН питающих подстанций при отсутствии исходных данных рекомендуется принимать: для режима максимальных нагрузок - 1,05 номинального, а для режима минимальных нагрузок - равное номинальному напряжению сети.

В результате выполнения практической работы необходимо получить схемы потокораспределения для нормального и послеаварийного режима в виде аналогично рисунку 22.

ПЕРЕЧЕНЬ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

Для выполнения практической работы необходимо: ПК с установленными RastrWin 3 и любым инструментом для расчёта параметров схем замещения.

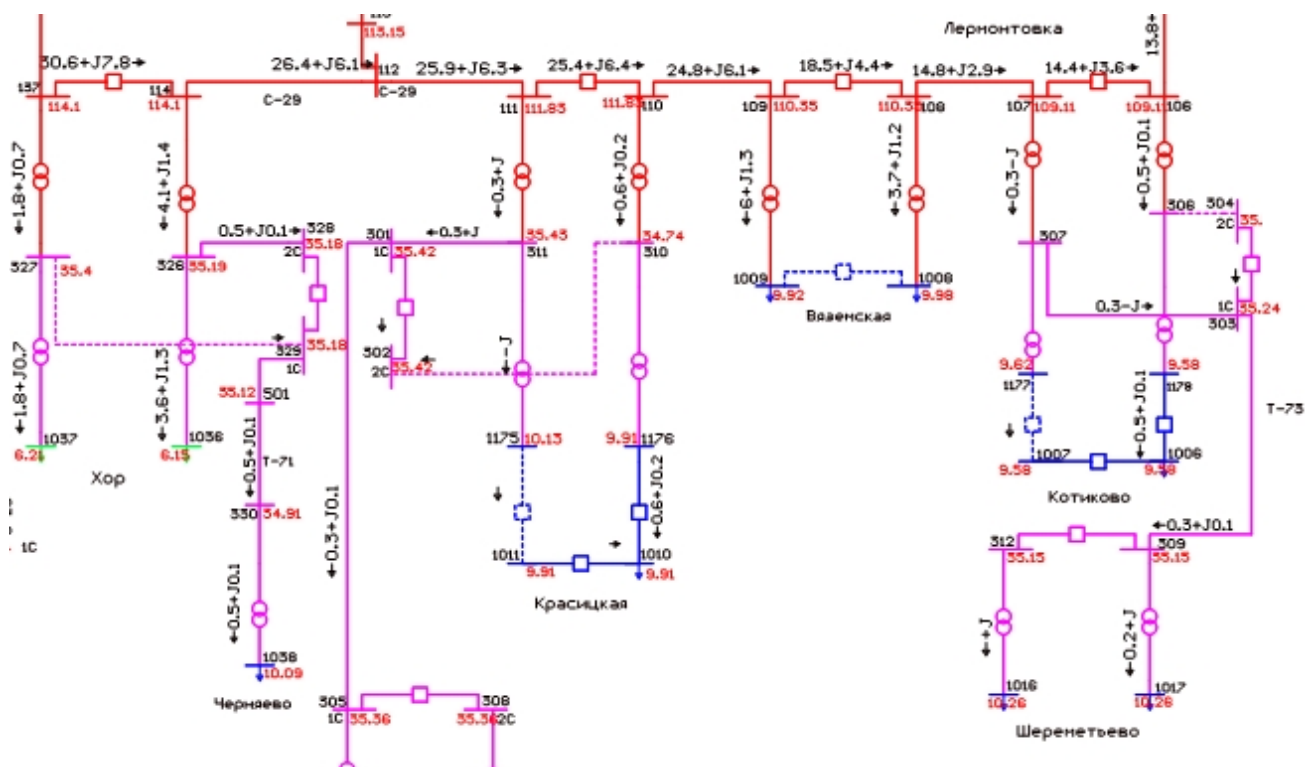


Рисунок 22 – Пример схемы потокораспределения.

ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Выполняется расчёт параметров схем замещения для всех элементов, приведённых на схеме. Нагрузки на шинах СН и НН трансформаторов необходимо вычислить исходя из загрузки каждого трансформатора на 60 %.
2. Составляется схема замещения для рассматриваемого участка сети.
3. Вводится расчётная модель электрической сети в ПК RastrWin и сохраняется в формате *.rg2.
4. Формируется графическая схема участка сети и сохраняется в формате *.grf.
5. Задаётся балансирующий узел, генерирующие узлы (при наличии в схеме генераторов).
6. Проводится расчёт установившегося режима. Выполняется анализ напряжений в узлах НН. При необходимости выполняется регулирование напряжений.
7. Оформляется отчёт по практической работе.

ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ

В отчёте по практической работе необходимо представить схему замещения с рассчитанными параметрами (согласно действующего в АмГУ ГОСТа по оформлению), таблицы «Узлы», «Ветви», «Анцапфы», «Трансформаторы», из ПВК RastrWin с заданными параметрами, и графическую схему потокораспределения.

ВЫВОДЫ

В результате выполнения практической работы закрепляются практические навыки расчётов электрических режимов, составления схем потокораспределения и регулирования напряжений в сети.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.

1. Закон встречного регулирования напряжения?
2. Способы задания узлов нагрузки?
3. Способы задания генераторных узлов?
4. Понятие балансирующего узла?
5. Понятие генераторного узла?
6. Расчёт коэффициентов трансформации в ПВК RastrWin?
7. Особенности расчёта режимов согласно ГОСТ Р 58670-2019 [12].

Практическая работа № 5

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПВК RastrWin 3

Цель: изучение структуры потерь мощности и энергии и практическое проведение анализа потерь мощности в электрической сети.

ЗАДАНИЕ

Для заданной по варианту схемы электрической сети (приложение 2):

1. Составить схему замещения. Рассчитать параметры схемы замещения.
2. Составить модель для расчётов установившихся режимов в ПВК RastrWin.

3. Оформить графическую схему потокораспределения расчёта установившегося режима.

4. Выполнить расчёт нормального режима. Напряжения на шинах низкого напряжения отрегулировать согласно закону встречного регулирования.

5. Выполнить расчёт потерь активной и реактивной мощностей в рассматриваемой сети, провести анализ эффективности работы электрической сети.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Показателем, отражающим эффективность работы ЭЭС, является величина потерь активной мощности, а именно их доля от вырабатываемой или передаваемой мощности.

По мнению международных экспертов в области энергетики относительные потери электроэнергии при ее передаче в электрических сетях не должны превышать 4%. Потери электроэнергии на уровне 10 % можно считать максимально допустимыми [4].

Фактические (отчетные) потери электроэнергии определяют как разность электроэнергии, поступившей в сеть, и электроэнергии, отпущенной из сети потребителям. Эти потери включают в себя составляющие различной природы: потери в элементах сети, имеющие чисто физический характер, расход электроэнергии на работу оборудования, установленного на подстанциях и обеспечивающего передачу электроэнергии, погрешности фиксации электроэнергии приборами ее учета и хищения электроэнергии, неоплату или неполную оплату показаний счетчиков и т. п. [4].

На основании уровня потерь электроэнергии можно сделать выводы о необходимости и объеме внедрения энергосберегающих мероприятий.

Расчеты потерь электроэнергии в сетях проводят для решения задач, которые можно разделить на две группы: внутриобъектные технико-экономические задачи и внешнеэкономические задачи, связанные с

взаимодействием с внешними государственными и вышестоящими ведомственными организациями.

К внутриобъектным задачам относятся задачи повышения экономичности функционирования объекта, осуществляемые самим персоналом, эксплуатирующим объект: выявление очагов потерь, разработка мероприятий по их снижению, создание системы стимулирования персонала и т. п.

К внешнеэкономическим задачам относятся задачи обоснования уровня потерь для формирования тарифов на электроэнергию.

Для решения внутриобъектных задач требуется максимально возможная детализация расчетов с определением потерь в каждом элементе сети, выявлением зон повышенных технических и коммерческих потерь, технико-экономической оценкой целесообразности проведения конкретных мероприятий для их снижения.

Разделение потерь на составляющие может проводиться по разным критериям: характеру потерь (постоянные, переменные), классам напряжения, группам элементов, производственным подразделениям и т. д.

Для целей нормирования потерь целесообразно использовать *укрупненную структуру потерь электроэнергии*, в которой потери разделены на составляющие, исходя из их физической природы и методов определения их количественных значений. Исходя из этого критерия, фактические потери могут быть разделены на четыре составляющие[4]:

2) ***технические потери электроэнергии***, обусловленные физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии и выражающимися в преобразовании части электроэнергии в тепло в элементах сетей. Технические потери не могут быть измерены. Их значения получают расчетным путем на основе известных законов электротехники;

3) ***расход электроэнергии на собственные нужды подстанций***, необходимый для обеспечения работы технологического оборудования подстанций и жизнедеятельности обслуживающего персонала. Расход электроэнергии на

собственные нужды подстанций регистрируются счетчиками, установленными на трансформаторах собственных нужд;

4) **потери электроэнергии, обусловленные инструментальными погрешностями ее измерения (инструментальные потери).** Эти потери получают расчетным путем на основе данных о метрологических характеристиках и режимах работы используемых приборов;

5) **коммерческие потери,** обусловленные хищениями электроэнергии, несоответствием показаний счетчиков оплате за электроэнергию бытовыми потребителями и другими причинами в сфере организации контроля над потреблением энергии. Коммерческие потери не имеют самостоятельного математического описания и, как следствие, не могут быть рассчитаны автономно. Их значение определяют как разницу между фактическими (отчетными) потерями и суммой первых трех составляющих.

В настоящее время расход электроэнергии на собственные нужды подстанций отражается в отчетности в составе технических потерь, а потери, обусловленные погрешностями системы учета электроэнергии, - в составе коммерческих потерь.

Три первые составляющие укрупненной структуры потерь обусловлены технологическими потребностями процесса передачи электроэнергии по сетям и инструментального учета ее поступления и отпуска. Сумма этих составляющих хорошо описывается термином **технологические потери.** Четвертая составляющая, коммерческие потери, представляет собой воздействие «человеческого фактора» и включает в себя все его проявления: сознательные хищения электроэнергии некоторыми абонентами с помощью изменения показаний счетчиков, потребление энергии мимо счетчиков, неоплату или неполную оплату показаний счетчиков, определение поступления и отпуска электроэнергии по некоторым точкам учета расчетным путем (при несовпадении границ балансовой принадлежности сетей и мест установки приборов учета) и т. п.

[4]

В ПВК RastrWin3 для анализа потерь по номинальным напряжениям используется таблица **Потери** (меню **Открыть – Потери**, номинальные напряжения необходимо завести вручную). Таблица имеет вид, показанный на рисунке 23.

	U_ном	dP	dP_ЛЭП	dP_Тр-р	Корона	XX_тр	dP_Ш-нт	dQ	dQ_ЛЭП	dQ_Тр-р	Q_Ген...	Q_XX_тр	dQ_Ш-нт
1	220	184.34	184.34		0.00			-654.24	718.38		-1 372.62		-17.22
2	500	622.51	610.24	12.27	0.00			-5 948.50	5 738.47	781.22	-12 468.20		4 207.02

Рисунок 23 – Таблица «Потери» в ПВК RastrWin3.

С помощью данной таблицы можно определить следующие виды потерь:

- суммарные потери в сети (столбец **dP**);
- нагрузочные потери в ЛЭП (**dP_ЛЭП**);
- нагрузочные потери в трансформаторах(**dP_Тр-р**);
- постоянные потери в ЛЭП (**Корона**);
- потери холостого хода в трансформаторах(**XX_Тран**);
- потери в шунтах узлов(**dP_Ш-нт**).

Результаты анализа потерь удобно представлять в виде круговых диаграмм или гистограмм. При этом в рамках круговой диаграммы необходимо брать только активные потери или только реактивные потери. На гистограмме удобно сопоставить абсолютные значения потерь активной и реактивной мощности в различных жлементях схемы.

Для получения структуры потерь по схеме в целом или по некоторому району сетей (РЭСу) целесообразно использовать таблицу Районы в меню Открыть/Районы/Районы.

Для этого во вкладке Открыть/Районы/Районы задаётся номер района (обычно 1). В таблице Узлы в столбце **Район** для каждого узла присваивается номер района, заданного в таблице Районы.

После расчёта режима в таблице **Районы** отображаются составляющие технических потерь с разбивкой по линиям трансформаторам и т.д.

Пример таблицы «Районы» приведён на рисунке 24

	№-н	Район	№об	Рген	Рнаг	Dr	Рпотр	dP_ЛЭП	dP_нагр	dP_пост	dQ_пост	Dq	dQ_нагр	dQ_ЛЭП	dP_Тр	Рвн	dP_Ш
1	1			42	40	1,78	42	1,17	1,51	0,27	2,00	9,98	7,98	1,85	0,34	0	

Рисунок 24– Таблица «Районы».

ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ

В отчёте по практической работенеобходимо представить схему замещения с рассчитанными параметрами (согласно ГОСТ АмГУ по оформлению), таблицы «Узлы», «Ветви», «Потери» и «Районы» графическую схему потокораспределения из ПВК RastrWin, а так же построенные по результатам расчёта потерь диаграммы, характеризующие состав потерь активной и реактивной мощности в рассматриваемой сети. Выполнить анализ потерь по построенным диаграммам. Предложить мероприятия для снижения технических потерь.

ВЫВОДЫ

В результате выполнения практической работы закрепляются практические навыки выполнения расчётов потерь мощности и их анализа.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

1. Назначение расчета и анализа потерь мощности?
2. Виды потерь мощности?
3. На какие виды можно разделить потери по критерию: характер потерь?
Опишите эти виды.
4. Какие виды потерь позволяет определить ПВК RastrWin?

Практическая работа № 6

ВЫПОЛНЕНИЕ ВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ В ЭЭС С ПОМОЩЬЮ

RasrtWin3

Цель работы: получение практических навыков выполнения вариантов расчётов в ПВК RastrWin.

ЗАДАНИЕ

Для схемы электрической сети приведённой на рисунке 25.

Составить схему замещения. Рассчитать параметры схемы замещения.

1. Составить расчётную модель для расчётов установившихся режимов в ПВК RastrWin.

2. Оформить схему потокораспределения в ПВК RastrWin.

3. Выполнить расчёт нормального режима.

4. Выполнить варианты расчёты и построить график изменения анализируемой величины согласно варианту задания, приведённого в таблице 3.

5. Сделать выводы по результатам проведённых расчётов.

Таблица 3 - Задание для практической по вариантным расчётам.

№	Задача	(Рекомендуемые контролируемые величины) - КВ	Использовать вкладку
1	2	3	4
1	Построить с помощью вариантов расчётов зависимость потерь активной и реактивной мощности в сети от напряжения в генераторном узле	$\Delta P, V_{зд}$	Узел VQlim Или Узел VGш
2	Определить наиболее тяжёлый послеаварийный режим при отключении одной линии (определить наиболее загруженную ветвь в режиме N-1)	Ток контролируемых ветвей, нагрузка контролируемых ветвей	Ветвь сост.
3	Определить зависимость напряжения на ПС1 при изменении коэффициента трансформации автотрансформатора	V, Kт	Ветвь Kт/Напц
4	Построить зависимость потерь в сети при изменении нагрузки на ПС2	$\Delta P, P_{наг}(Q_{наг})$	Ветвь PQ_наг
5	Определить изменение напряжения при изменении сечения провода линии (Изменение активного сопротивления)	V, R	Ветвь RXB.

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
6	Определить, как изменятся потери мощности при отключении подстанций, системы, генераторов.	ΔP	Узел сост.
7	Построить зависимость напряжения на ПС2 при изменении генерации мощности в узле 1	$V, P_{\text{ген}}(Q_{\text{ген}})$	Ветвь PQ_ген
8	Определить изменение тока в ветви ЛЭП3 при изменении заданного модуля напряжения генератора	Ток контролируемых ветвей, $V_{\text{зд}}$	Узел VQlim
9	Построить с помощью вариантных расчётов зависимость потерь активной и реактивной мощности в сети от напряжения в генераторном узле	$\Delta P, V_{\text{зд}}$	Узел VGш
10	Построить зависимость потерь активной и реактивной мощности в сети при изменении нагрузки на ПС2	$\Delta P, P_{\text{наг}}$	Узел PQнаг
11	Определить изменение напряжения при изменении сечения провода линии(Изменение индуктивного сопротивления)	V, X	Ветвь RXB.
12	Построить зависимость напряжения на ПС1 при изменении генерации мощности на генераторе		Узел PQген
13	Определить зависимость напряжения на ПС2 при изменении коэффициента трансформации автотрансформатора	V, K_T	Ветвь Kт/Напц
14	Определить изменение тока в ветви ЛЭП2 при изменении заданного модуля напряжения генератора	Ток контролируемых ветвей, $V_{\text{зд}}$	Узел VQlim
15	Показать зависимость тока, протекающего по ЛЭП 3 при увеличении нагрузки	$\text{delta}P_{\text{наг}}$, Ток контролируемых ветвей	Узел deltaPQнаг
16	Показать зависимость тока, протекающего по ЛЭП 3 при изменении генерации мощности на генераторе	$\text{delta}P_{\text{ген}}$, Ток контролируемых ветвей	Узел deltaPQген
17	Показать зависимость тока, протекающего по ЛЭП 2 при увеличении нагрузки 4	$\text{delta}P_{\text{наг}}$, Ток контролируемых ветвей	Узел deltaPQнаг
18	Определить изменение напряжения при изменении сечения провода линии(Изменение емкостной проводимости)	V, B	Ветвь RXB.
19	Показать зависимость тока, протекающего по ЛЭП 1 при увеличении нагрузки 2	$\text{delta}P_{\text{наг}}$, Ток контролируемых ветвей	Узел deltaPQнаг
20	Построить зависимость потерь активной и реактивной мощности в сети при изменении нагрузки на ПС1	$\Delta P, P_{\text{наг}}$	Узел PQнаг

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Вариантные расчёты в RastrWin являются инструментом, аналогичным программированию: по заранее известному алгоритму выполняется последовательное изменение параметров сети или параметров режима. Это позволяет упростить и ускорить выполнение однотипных операций.

Назначение вариантных расчётов следующее:

1. Обработка заявок на отключение линий электропередачи и блоков. Во многих случаях анализ заявок должен быть выполнен оперативно, поэтому заранее рассчитывают серии наиболее важных коммутаций, чтобы при поступлении той или иной заявки можно было практически мгновенно определить мероприятие по изменению режима.

2. Выбор уставок элементов системной автоматики аварийных режимов: устройства отключения генераторов и нагрузок, противоаварийной автоматики асинхронного хода и др.

3. Анализ режимов работы электрических систем на предстоящий сезон (зависит от времени года, режима работы отдельных станций и др.).

4. Расчеты предельных режимов.

5. Вариантные расчеты при проектировании развития ЭС.

Алгоритм выполнения вариантных расчётов, в RastrWin 3 следующий [6].

1. Задаются контрольные величины, которые необходимы для дальнейшего расчёта и анализа. Для этого нужно поставить курсор на необходимую величину в таблице Узлы, Ветви и др., правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню, выбрать **Добавить в КВ** (рисунок 25);

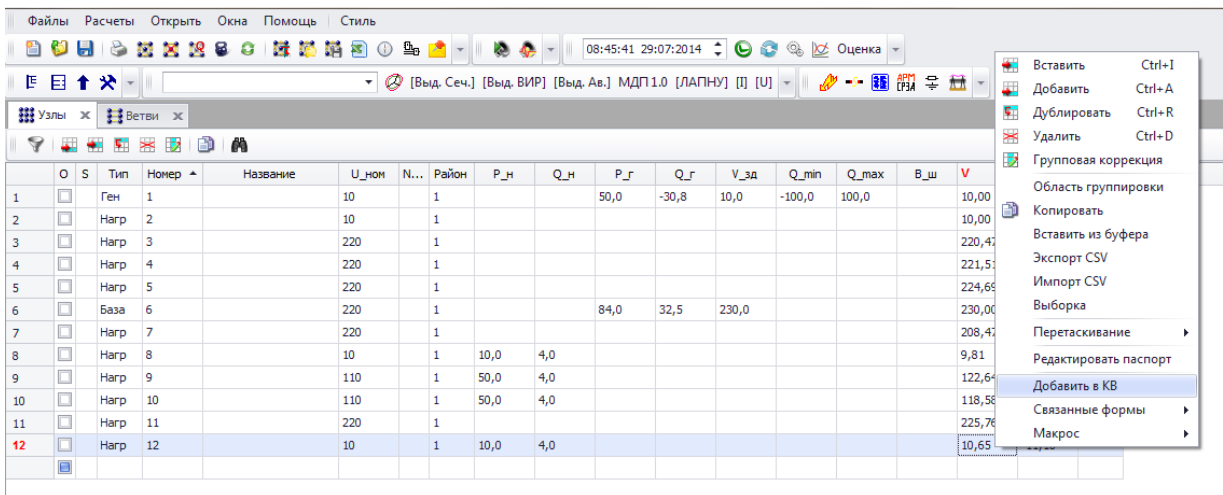


Рисунок 25 – Добавление величины в KB.

2. Задаются изменяемые величины (отключаемые элементы нагрузки, мощности компенсирующих устройств). Для этого в меню Открыть/Вариант.р-ты заполняются таблицы «Варианты_Название» и «Варианты_Содержание» (рисунок 26).

В таблице «Варианты_Название» задаётся нумерация, названия и состояния варианта. Здесь необходимо задать уникальный номер варианта, и название данного варианта (рисунок 26).

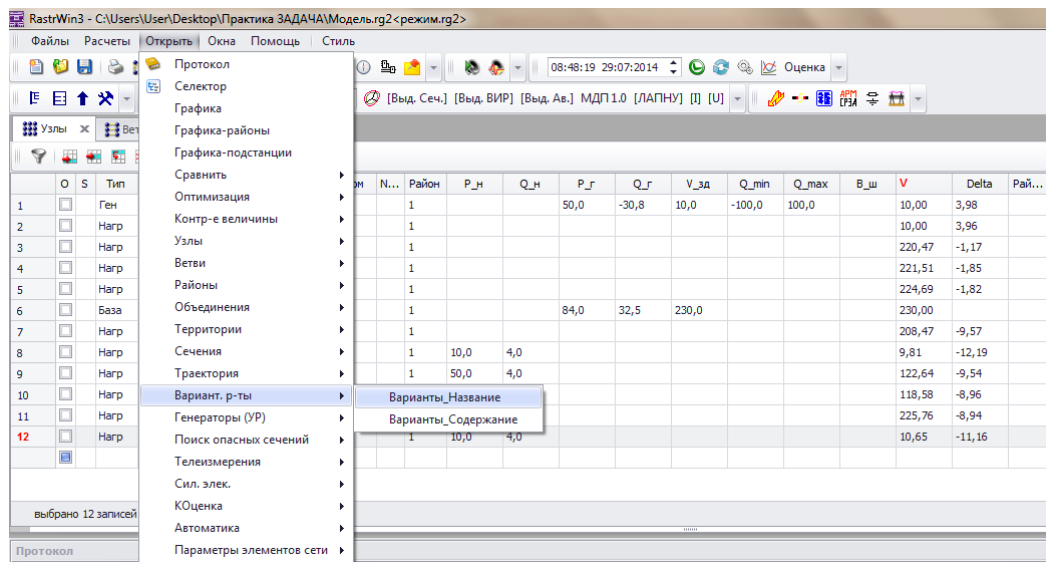


Рисунок 26 – Открытие таблиц Варианты_Название и Варианты_Содержание.

Таблица «Варианты_Содержание» (рисунок 27) используется для описания изменений, вносимых в режим. В этой таблице нужно задать номер варианта, из

таблицы «Варианты_Название», тип изменения (отключение линии, изменение параметров и и т.д.) и значение изменяемых параметров.

	S	O	Номер	Название
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	Нагрузка ПС, 00-02
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2	Нагрузка ПС, 02-04
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	Нагрузка ПС, 04-06
4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4	Нагрузка ПС, 06-08
5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5	Нагрузка ПС, 08-10
6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6	Нагрузка ПС, 10-12
7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7	Нагрузка ПС, 12-14
8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8	Нагрузка ПС, 14-16
9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9	Нагрузка ПС, 16-18
10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10	Нагрузка ПС, 18-20
11	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11	Нагрузка ПС, 20-22
12	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12	Нагрузка ПС, 22-24

Рисунок 27 – Таблица Варианты_Название.

В таблице **Варианты_Содержание** **Ny/N_нач** – номер узла или номер начала линии, **N_кон** – номер конца линии, в которых осуществляются изменения. Значения изменяемых параметров заполняется в столбцах **Значение1**, **Значение2** или **Значение3**. Изменяемый параметр при выполнении вариантных расчётов задаётся в столбце **Тип (рисунок28)**.

S	Номер	A	FOL	Тип	Ny/Nb	Ne	Np	Значен...	Значен...	Значен...
1	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел PQнаг	11			1,5	1,9	
2	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел BGш	11			-18000		
3	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел PQнаг	11			2,7	1,8	
4	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел BGш	11			-18000		
5	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел PQнаг	11			4,2	1,5	
6	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел BGш	11			-18000		
7	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел PQнаг	11			5,4	1,8	
8	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел BGш	11			-18000		
9	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел PQнаг	11			5,6	2	
10	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел BGш	11			-18000		
11	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел PQнаг	11			5,2	1,9	
12	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел BGш	11			-18000		
13	7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Ветвь сост.	11			4	1,5	
14	7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Узел BGш	11			-18000		

Рисунок 28 – Таблица «Варианты_Содержание».

Пример изменения нагрузки и мощности батареи конденсаторов в узле 11 в таблице Варианты_Содержание показан на рисунке 29.

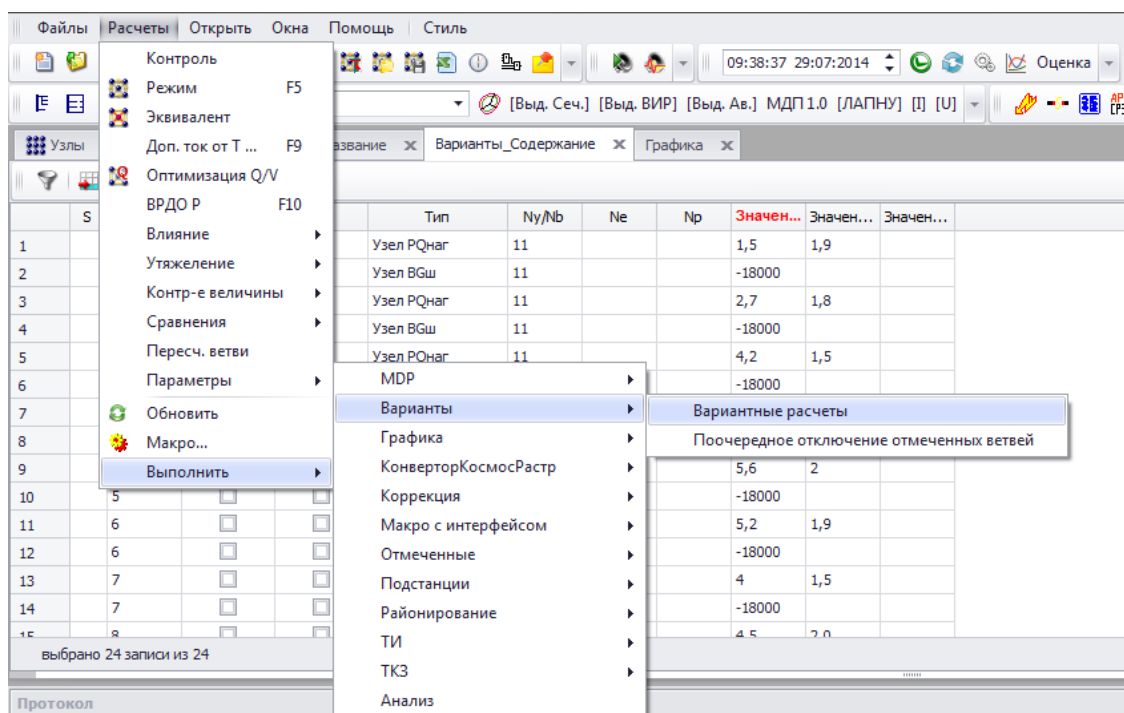


Рисунок 29 – Макрос вариантных расчётов.

3. Выполняется вариантный расчёт. В меню **Расчеты – Выполнить** выбирается макрос **Вариантные расчёты** (рисунок 35). При запуске макрос

запрашивает имя файла базового режима, а затем путь, по которому следует сохранить файлы вариантных расчетов.

Возможности, заложенные в программе RastrWin по выполнению вариантных расчетов, подробно описаны в [6] и представлены таблице 4.

Таблица 4 – Правила изменения полей при выполнении вариантных расчетов в RastrWin 3.

Тип изменения	Описание	Значения
1	2	3
Ветвь сост.	Отключение или включение ветви	Значение1=0 - Отключить Значение1=1 - Включить
Ветвь PXB	Изменение параметров ветви	Значение1- R Значение2- X Значение3- B
Ветвь Кт/Нанц	Изменение Кт или №_анцапфы	Значение1 - Кт Значение2 - N_анц
Ветвь N_реакт	Изменение числа реакторов на линии	Значение1- Np-p_нач Значение2- Np-p_кон
Узел сост.	Отключение или включение узла	Значение1=0 - Отключить Значение1=1 - Включить
Узел PQнаг	Изменение нагрузки узла	Значение1- P_наг Значение2 - Q_наг
Узел PQген	Изменение генерации узла	Значение1- P_ген Значение2 - Q_ген
Узел VQlim	Изменение заданного модуля и диапазонов реактивной мощности	Значение1 – V_зд Значение2 – Q_min Значение3 – Q_max
Узел VGш	Изменение параметров шунта в узле (постоянная часть)	Значение1 - V_зд
Узел N_реакт	Изменение числа реакторов в узле	Значение1 - Np-p
Узел deltaPQнаг	Увеличение нагрузки узла на заданную величину	Значение1 -deltaP_наг Значение2 - deltaQ_наг
Узел deltaPQген	Увеличение генерации узла на заданную величину	Значение1 -deltaP_ген Значение2 - deltaQ_ген
Ген. сост.	Отключение или включение генератора	Значение1=0 - Отключить Значение1=1 – Включить

Продолжение таблицы 4

1	2	3
Ген. P&Iim	Изменение мощности генератора	Значение1 - P Значение2 – P_min Значение3 – P_max
Ген. Qlim	Изменение пределов реактивной мощности генератора	Значение1 - Q_min Значение2 - Q_max

ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Выполняется расчёт параметров схемы замещения.
2. Формируется расчётная схема в ПВК RastrWin для установившихся режимов.
3. Проводится расчёт установившегося режима. При необходимости выполняется регулирование напряжений.
4. По индивидуальному варианту Выполняются вариантные расчеты, проводится анализ эффективности изменений, делаются выводы.
5. Оформляется отчёт по практической работе.

ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ

В отчёте по практической работенеобходимо представить схему замещения с рассчитанными параметрами (согласно ГОСТ по оформлению), таблицы «Узлы», «Ветви», «Варианты_Название», «Варианты_Содержание», и графики изменения контролируемых величин.

ВЫВОДЫ

В результате выполнения практической работызакрепляются практические навыки выполнения вариантных расчётов и их анализа.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

1. Назначение вариантных расчётов?
2. Опишите алгоритм выполнения вариантных расчетов в RastrWin3.

Практическая работа № 7

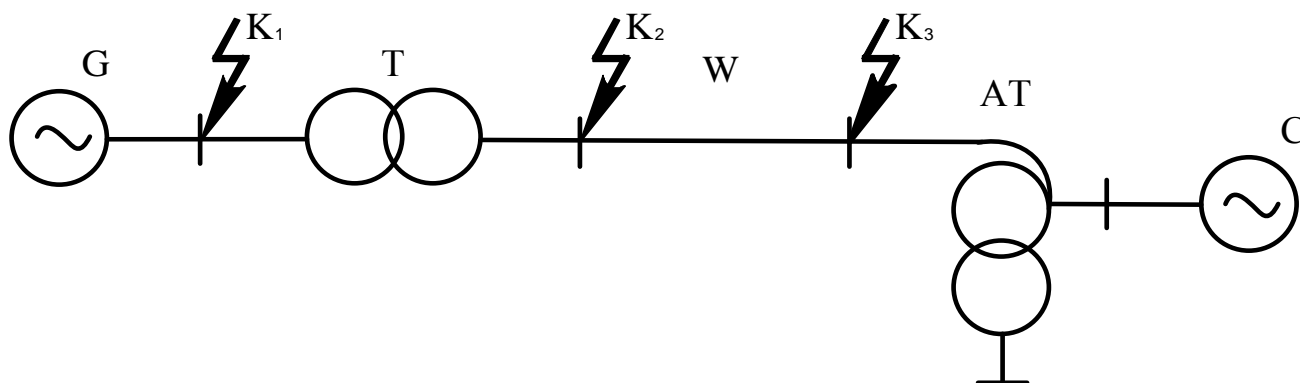
РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ПВК RASTRWIN.

Цель работы: ознакомление с порядком расчёта токов короткого замыкания в ПВК RastrWin3 (RastrKZ).

ЗАДАНИЕ

Для обобщённой схемы, приведённой на рисунке 33, по параметрам, приведённым в таблице 5, согласно заданного варианта выполнить следующее:

1. Подготовить однолинейную схему электрической сети.
2. Составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и рассчитать их параметры. При расчёте принять, что **нейтралы ВН** всех трансформаторов **Т** на электростанции и **АТ** на приёмной ПС заземлены.
3. Смоделировать заданную сеть для расчёта токов КЗ в RastrWin 3.
4. Рассчитать симметричные и все возможные несимметричные токи КЗ (предусмотренные программой) в точке согласно задания.
5. В ПВК RastrWin 3 создать графическую схему с результатами расчёта токов КЗ.



Точка К1 – шины НН станции; Точка К2 – шины ВН станции;

Точка К3 – шины ВН АТ.

Рисунок 30 – Расчётная схема сети.

Таблица 5 – Исходные данные для выполнения практической работы по расчёту ТКЗ в ПК RastrWin 3.

№ варианта	Параметры электрической станции				Параметры ЛЭП			Параметры приёмной подстанции		Параметры системы	Номер точки КЗ для расчёта
	Кол-во генераторов	Тип генераторов	Количество трансформаторов	Тип Трансформаторов	Марка провода	Длина ЛЭП, км	Кол-во цепей ЛЭП	Кол-во АТ	Тип АТ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	ТГВ-500-4УЗ	1	ТЦ-630000/220	АС 300/67	0	2		АТДЦТН-250000/220/110	S _{кз} =400 МВА U _{ном} =110 кВ	1
2	1	ТВВ-220-2ЕУЗ	1	ТДЦ-250000/220	АС 240/39	9	2		АТДЦТН-250000/220/110	S _{кз} =300 МВА U _{ном} =110 кВ	2
3	1	ТВМ-300-УЗ	1	ТДЦ-400000/220	АС 300/67	5	2		АТДЦТН-200000/220/110	S _{кз} =250 МВА U _{ном} =110 кВ	3
4	1	ТВФ-120-2УЗ	1	ТДЦ-125000/330	2 × АС 240/32	5	1		АТДЦТН-125000/330/110	S _{кз} =100 МВА U _{ном} =110 кВ	3
5	1	СВ-1260/235-60Т	1	ТДЦ-250000/220	АС 240/32	7	2		АТДЦТН-250000/220/110	S _{кз} =300 МВА U _{ном} =110 кВ	2
6	1	СВ-1500/175-84	1	ТДЦ-200000/220	АС 240/39	0	2		АТДЦТН-200000/220/110	S _{кз} =400 МВА U _{ном} =110 кВ	1
7	2	СВ-850/120-60	2	ТРДН-40000/110	АС 240/56	1	2		АТДЦТН-125000/220/110	S _{кз} =250 МВА U _{ном} =220 кВ	1

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8	1	СВ-1100/250-36У4	1	ТДЦ-400000/22073У1	4хАС 400/64	5	2		АОДЦТН-267000/750/220	Sk3=2000 МВА UНОМ=750 кВ	К2
9	1	ТВФ-63-2У3	1	ТРДН-63000/110	АС 240/56	5	2		АТДЦТН-63000/220/110	Sk3=400 МВА UНОМ=220 кВ	К1
10	1	ТВВ-220-2ЕУ3	1	ТДЦ-250000/220	АС 240/39	8	2		АТДЦТН-250000/220/110-75У1	Sk3=300 МВА UНОМ=110 кВ	К1
11	1	СВФ-1690/175-64	1	ТЦ-630000/500	3 × АС 300/66	5	1		АТДЦН-500000/500/220	Sk3=2500 МВА UНОМ=220 кВ	К2
12	1	ТГВ-800-2У3	1	ТЦ-1000000/500	3 × АС 400/51	0	1		АОДЦТН-417000/750/500	Sk3=2000 МВА UНОМ=750 кВ	К2
13	3	ТВВ-800-2ЕУ3	3	ТЦ-1000000/500	3 × АС 500/64	8	2		АОДЦТН-417000/750/500	Sk3=2500 МВА UНОМ=750 кВ	К1
14	1	ТВФ-120-2У3	1	ТДЦ-125000/330	2 × АС 240/32	8	1		АТДЦТН-125000/330/110	Sk3=300 МВА UНОМ=110 кВ	К2
15	1	СВ-1190/250-48	1	ТДЦ-250000/330	2 × АС 400/51	2	1		АТДЦТН-250000/330/150	Sk3=400 МВА UНОМ=150 кВ	К3
16	1	СВ-1436/200-80УХЛ4	1	ТДЦ-250000/500	3 × АС 400/51	5	1		АТДЦТН-250000/500/110	Sk3=2500 МВА UНОМ=110 кВ	К3
17	1	СВФ-830/225-28	1	ТДЦ-400000/500	3 × АС 400/51	5	1		АОДЦТН-417000/750/500	Sk3=2000 МВА UНОМ=750 кВ	К2
18	1	СВ-808/130-40У4	1	ТРДЦН-63000/110	АС 240/56	5	2		АТДЦТН-63000/220/110	Sk3=300 МВА	К1

Продолжение таблицы 5

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	1	СВ-850/190-40	1	ТРДЦН-100000/220	АС 240/32	9	1		АТДЦТН-125000/220/110	S _{кз} =300 МВА U _{ном} =110 кВ	2
20	1	ТВФ-120-2У3	1	ТРДЦН-125000/110	АС 240/56	3	2		АТДЦТН-125000/220/110	S _{кз} =450 МВА U _{ном} =220 кВ	3
21	1	ТВВ-160-2ЕУ3	1	ТДЦ-200000/220	АС 300/39	5	2		АТДЦТН-200000/220/110	S _{кз} =300 МВА U _{ном} =110 кВ	3
22	1	ТВФ-63-2ЕУ3	1	ТРДЦН-63000/110	АС 185/24	0	2		АТДЦТН-63000/220/110	S _{кз} =400 МВА U _{ном} =220 кВ	2
23	1	СВ-1490/170-96УХЛ4	1	ТДЦ-125000/110	АС 120/27	5	2		АТДЦТН-125000/220/110	S _{кз} =300 МВА U _{ном} =220 кВ	1
24	1	СВ-660/165-32	1	ТДЦ-80000/220	АС 240/32	5	2		АТДЦТН-125000/220/110	S _{кз} =400 МВА U _{ном} =110 кВ	2
25	2	ТВФ-120-2У3	2	ТРДЦН-125000/110	АС 240/56	6	2		АТДЦТН-125000/220/110	S _{кз} =450 МВА U _{ном} =220 кВ	3

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Расчет токов короткого замыкания необходим для выбора и проверки электрооборудования по условиям короткого замыкания; для выбора уставок и оценки возможного действия релейной защиты и автоматики; для определения влияния токов нулевой последовательности линий электропередачи на линии связи; для выбора заземляющих устройств.

При расчетах токов КЗ допускается не учитывать:

- 1) сдвиг по фазе ЭДС и изменение частоты вращения роторов синхронных генераторов, компенсаторов и электродвигателей, если продолжительность КЗ не превышает 0,5 с;
- 2) ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;
- 3) насыщение магнитных систем электрических машин;
- 4) поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и напряжением 330–500 кВ, если их длина не превышает 150 км.

Расчет периодической составляющей тока КЗ допускается производить, не учитывая активные сопротивления элементов электроэнергетической системы, если результирующее эквивалентное сопротивление относительно точки КЗ не превышает 30% результирующего эквивалентного индуктивного сопротивления.

Схема замещения электроэнергетической системы представляет собой совокупность схем замещения ее отдельных элементов, соединенных между собой в той же последовательности, что и на расчетной схеме.

Для проведения расчётов ТКЗ необходимо иметь расчётную схему электрической сети рассматриваемой энергосистемы. На основе расчетной схемы составляют схему замещения электроэнергетической системы.

Составление схемы замещения и расчёт её параметров выполняется в соответствии с РД 153-34.0-20.527-98 [10].

Программный комплекс RastrKZ (в составе Rastr 3) предназначен для расчета токов коротких замыканий и несимметричных режимов.

В настоящее время в Rastr 3 реализованы следующие функции [6, 8]:

- Расчет металлических КЗ 1, 2, 3, 1.1, одно и многократных;
- Учет взаимоиндукции линий;
- Учет мнимых коэффициентов трансформации;
- Расчет влияния размыкания линий на ТКЗ и шунты;
- Ускоренный расчет повреждений без рефакторизации матрицы проводимости;
 - Расчет шунта для моделирования КЗ в расчете установившегося режима и электромеханическом переходном процессе;
 - Расчет тока в грозотросе ЛЭП.

В данной практической работе рассматривается только расчёт токов КЗ в начальный момент времени при симметричном и несимметричных КЗ.

Для выполнения расчётов необходимо составление схемы замещения и расчёт её параметров. Параметры элементов схем замещения в ПВК RastrWin 3 задаются в именованных единицах (Ом, кВ) без приведения значений параметров расчетных схем к одной ступени напряжения сети и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

При расчете начального значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ ($I_{П0}$) должны быть учтены все синхронные генераторы и компенсаторы, а также синхронные и асинхронные электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если эти электродвигатели не отделены от точки КЗ токоограничивающими реакторами или силовыми трансформаторами. В автономных системах при расчетах токов КЗ следует учитывать и электродвигатели мощностью менее 100 кВт, если их доля в суммарном токе КЗ составляет не менее 5%.

На первом этапе расчета на основе принципиальной схемы электроэнергетической системы составляют расчетную схему. На ней в однолинейном изображении показывают источники электроэнергетической системы, точки КЗ и все силовые элементы, по которым возможно протекание тока КЗ.

Для синхронных генераторов и электродвигателей, которые до КЗ работали с перевозбуждением, сверхпереходную ЭДС (фазное значение) в киловольтах следует определять по формуле (9):

$$E_{\phi}'' = \sqrt{\left(U_{\phi|0|} + I_{|0|} \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi_{|0|} \right)^2 + \left(I_{|0|} \cdot x_d'' \cdot \cos \varphi_{|0|} \right)^2}, \quad (9)$$

где $U_{\phi|0|}$ – фазное напряжение на выводах машины в момент, предшествующий КЗ, кВ;

$I_{|0|}$ – ток статора в момент, предшествующий КЗ, кА;

$\varphi_{|0|}$ – угол сдвига фаз напряжения и тока в момент, предшествующий КЗ, град.

Для синхронных генераторов и электродвигателей, работавших до КЗ с недовозбуждением, сверхпереходную ЭДС следует определять по формуле 10:

$$E_{\phi}'' = \sqrt{\left(U_{\phi|0|} - I_{|0|} \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi_{|0|} \right)^2 + \left(I_{|0|} \cdot x_d'' \cdot \cos \varphi_{|0|} \right)^2}. \quad (10)$$

Для синхронных компенсаторов, работавших до КЗ с перевозбуждением,

$$E_{\phi}'' = U_{\phi|0|} + I_{|0|} \cdot x_d'' , \quad (11)$$

Для синхронных компенсаторов, работавших до КЗ с недовозбуждением

$$E_{\phi}'' = U_{\phi|0|} - I_{|0|} \cdot x_d'' . \quad (12)$$

Для асинхронных электродвигателей сверхпереходную ЭДС следует определять по формуле 13:

$$E''_{\phi} = \sqrt{\left(U_{\phi|0} - I_{|0} \cdot x'' \cdot \sin \varphi_{|0}\right)^2 + \left(I_{|0} \cdot x'' \cdot \cos \varphi_{|0}\right)^2}. \quad (13)$$

Для эквивалентного источника (системы):

$$E''_{\phi} = E_{\phi} = U_{\phi|0}. \quad (14)$$

Для эквивалентной нагрузки:

$$E''_{\phi} = 0,85 \cdot U_{\phi|0}. \quad (15)$$

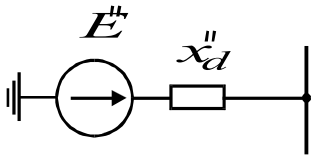
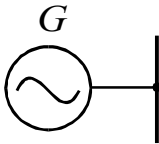
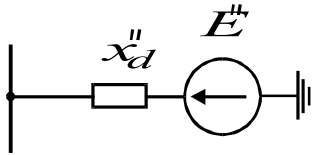
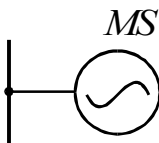
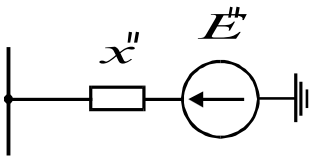
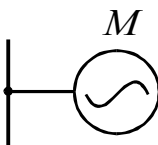
Если параметры режима, предшествующего КЗ, не заданы, то принимают, что до КЗ электрические машины работали в номинальном режиме.

Наиболее часто встречающиеся расчетные схемы элементов электроэнергетической системы и выражения для расчетов сопротивлений их схем замещений приведены в таблице 6.

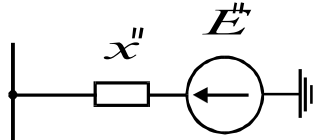
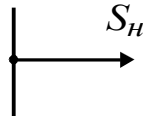
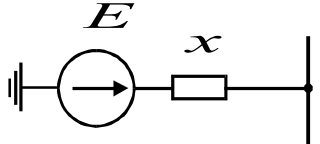
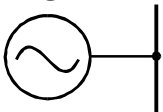

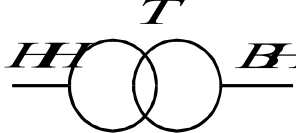
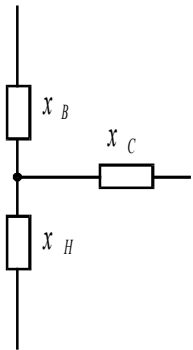
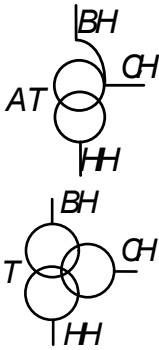
Для расчета токов при несимметричных КЗ используется метод симметричных составляющих. При этом кроме схемы замещения прямой последовательности для расчета двухфазного КЗ необходимо составить схему замещения обратной последовательности, а для расчета однофазного и двухфазного КЗ на землю - также схему замещения нулевой последовательности.

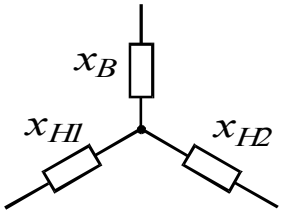
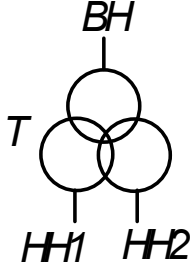
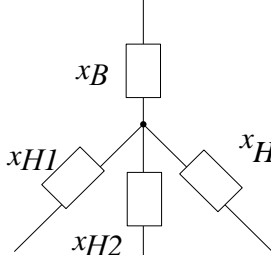
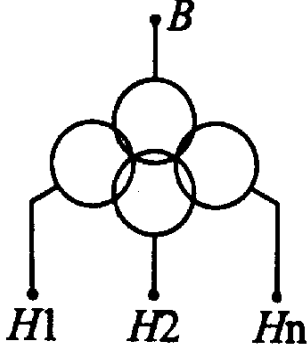
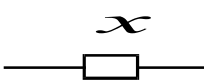

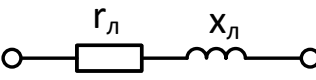
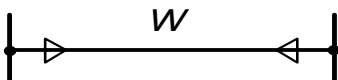
Схема замещения обратной последовательности по конфигурации аналогична схеме замещения прямой последовательности, т.е. в ней должны быть представлены все элементы исходной расчетной схемы.

Таблица 6– Расчетные схемы и параметры расчетных схем элементов прямой последовательности

Наименование элемента	Схема замещения	Расчётная схема	Сопротивления элементов
1	2	3	4
Генератор (синхронный компенсатор)			$x = x_d'' = x_{*d(ном)}'' \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Синхронный двигатель			$x = x_d'' = x_{*d(ном)}'' \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}};$ $x_{*d(ном)}'' = \frac{I}{I_{*пуск}} \cdot \sqrt{1 - (M_{*пуск} / I_{*пуск})^2}$
Асинхронный двигатель			$x = x'' = x_{*(ном)}'' \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}};$ $x_{*(ном)}'' = \frac{I}{K_{\Pi}}; \quad S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi_{ном} \cdot \frac{\eta}{100}}$

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4
Эквивалентная нагрузка			$x = x'' = 0,35 \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Эквивалентный источник (система)			$x = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{отк.ном}} \text{ или } x = x_{*(ном)} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Двухобмоточный трансформатор			$x = \frac{u_{к}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)			$x_B = \frac{0,5(u_{кBC} + u_{кBH} - u_{кCH})}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$ $x_C = \frac{0,5(u_{кBC} + u_{кCH} - u_{кBH})}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$ $x_H = \frac{0,5(u_{кBH} + u_{кCH} - u_{кBC})}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$

1	2	3	4
<p>Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части</p>			$x_B = \frac{0,125 \cdot u_{\kappa BH}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{номBH}}}$ $x_{H1} = x_{H2} = \frac{1,75 \cdot u_{\kappa BH}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{номBH}}}$
<p>Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на n ветвей</p>			$x_B = 0,01 \cdot \left(U_{\kappa B-H} - \frac{U_{\kappa H1-Hn}}{2n} \right)$ $x_{H1} = x_{H2} = x_{Hn} = 0,005 \cdot U_{\kappa H1-Hn}$
<p>Воздушная линия</p>			$x = x_l \cdot l$
<p>Кабельная линия</p>			$x = x_l \cdot l$ $R = R_l \cdot l$

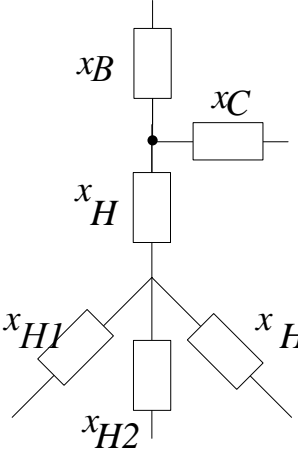
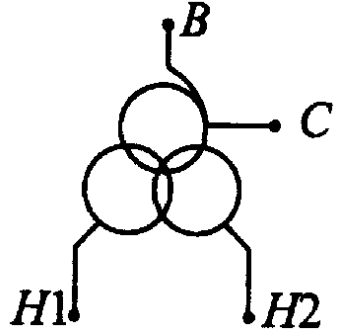
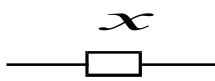
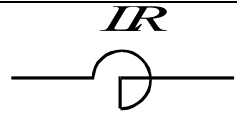
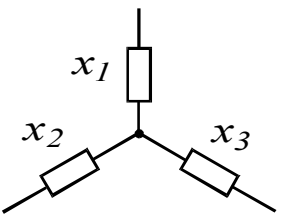
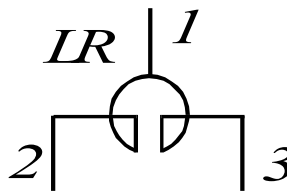
1	2	3	4
<p>Автотрансформатор с обмоткой НН, расщепленной на n ветвей</p>			$x_B = \frac{0,5(u_{\kappa BC} + u_{\kappa BH} - u_{\kappa CH})}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$ $x_C = \frac{0,5(u_{\kappa BC} + u_{\kappa CH} - u_{\kappa BH})}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$ $x_H = \frac{0,5(u_{\kappa BH} + u_{\kappa CH} - u_{\kappa BC})}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$ $x_{H1} = x_{H2} = x_{Hn} = 0,005 \cdot U_{\kappa H1-H2}$ $x'_H = x_H - 0,01 \cdot \frac{U_{\kappa H1-Hn}}{2n}$
<p>Реактор</p>			$x = x_{\text{НОМ}}$
<p>Сдвоенный реактор</p>			$x_1 = -k_{\text{св}} \cdot x_{\text{НОМ}}$ $x_2 = x_3 = (1 + k_{\text{св}}) \cdot x_{\text{НОМ}} \quad x_{\text{НОМ}}, k_{\text{св}}$

Схема замещения нулевой последовательности обычно существенно отличается от схем прямой и обратной последовательностей. Ее конфигурация определяется в основном положением расчетной точки КЗ и схемами соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов исходной расчетной схемы.

Циркуляция токов нулевой последовательности возможна только в том случае, если обмотка трансформатора, обращенная в сторону расчетной точки КЗ, соединена в звезду с заземленной нейтралью [10].

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности элементов вводятся в ПВК RastrWin 3 в таблицах «Ветви/Несим/ИД» и «Генератор/Несим».

В RastrWin 3 место заземления нейтрали в расчётной схеме обозначается в таблице «Узы/Несим/ИД» в графе **Тип0**. Значение «зак» – представляет собой землю в нулевой последовательности. Значение «у» – представляет собой не заземлённый узел в нулевой последовательности [6].

Схема замещения нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y_0/Δ , представлена на рисунке 31а.

В исходной схеме замещения нулевой последовательности трансформатор с указанной схемой соединения обмоток представляется в виде одного индуктивного сопротивления $X_{T0} = X_I + X_{II}$, которое с противоположной стороны (идя от расчетной точки КЗ) соединяется с точкой нулевого потенциала схемы замещения (с землей) [10].

В случае соединения обмоток двухобмоточного трансформатора по схеме Y_0/Y циркуляция токов нулевой последовательности в обмотке, соединенной в звезду, невозможна (см. схему замещения нулевой последовательности такого трансформатора на рисунке 31б. Поскольку у трансформаторов с номинальным напряжением обмоток свыше 1 кВ сопротивление X_{H0} весьма значительно, то в схему замещения нулевой последовательности такие трансформаторы не вводят.

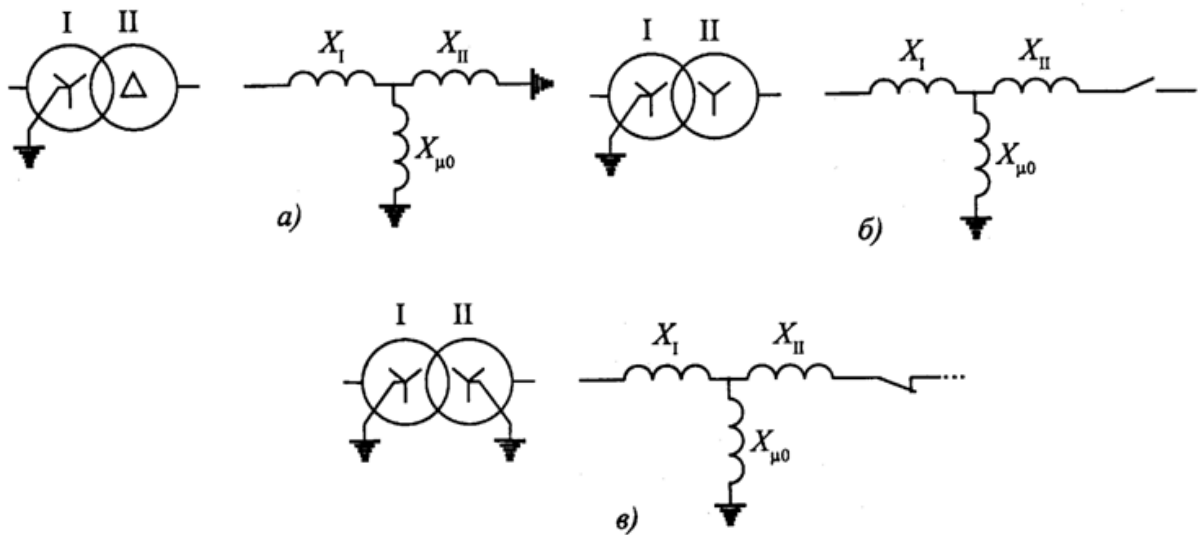


Рисунок 31 – Схемы замещения нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов.

Схема замещения нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y_0/Y_0 , представлена на рисунке 31б. Трансформатор необходимо вводить в исходную схему замещения нулевой последовательности только в том случае, если на стороне обмотки II имеется контур для циркуляции токов нулевой последовательности (имеются в виду электроустановки напряжением свыше 1 кВ, когда $X_{\mu 0} \gg X_I + X_{II}$).

Сопротивление нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, зависит от схемы соединения двух других обмоток. Обычно одна из них соединена треугольником, а другая может быть соединена или треугольником, или в звезду с изолированной нейтралью, или в звезду с заземленной нейтралью [10].

Если обе обмотки соединены в треугольник, компенсация тока нулевой последовательности обмотки, обращенной к расчетной точке КЗ, осуществляется токами обеих обмоток, соединенных треугольником, и схема замещения нулевой последовательности такого трансформатора имеет вид, как показано на рисунке 32а. При этом сопротивление нулевой последовательности трансформатора $X_{T0} = X_I + X_{II} // X_{III}$.

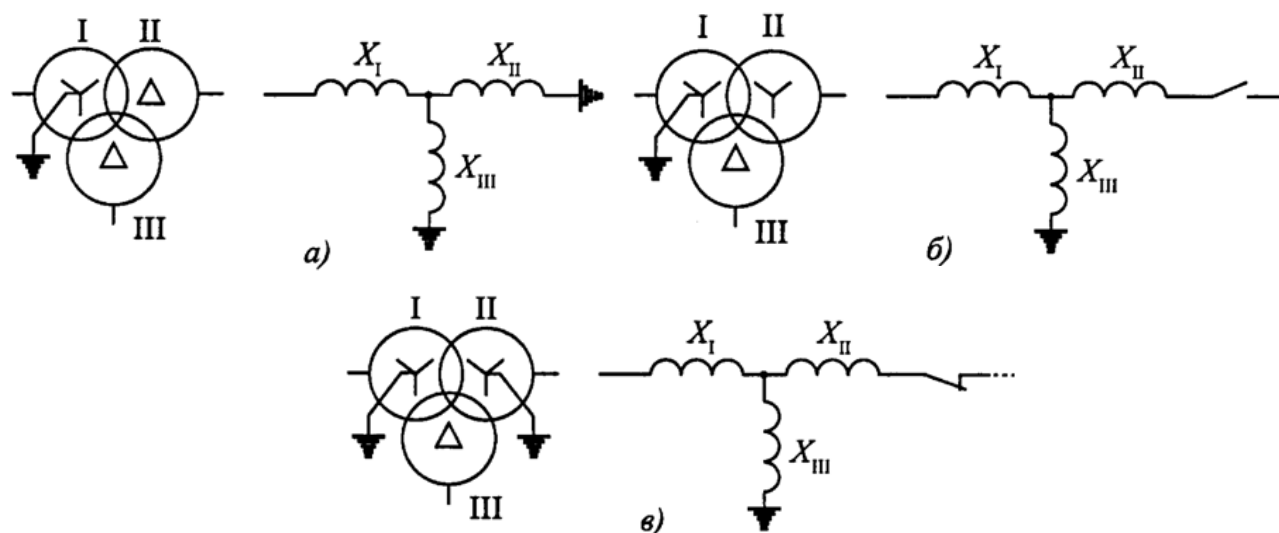


Рисунок 32 – Схемы замещения нулевой последовательности трехобмоточных трансформаторов.

Если одна из них соединена треугольником, а другая соединена в звезду с изолированной нейтралью, протекание тока нулевой последовательности невозможно, поэтому сопротивление нулевой последовательности такого трансформатора $X_{T0} = X_I + X_{III}$.

Если одна из них соединена треугольником, а другая соединена в звезду с заземленной нейтралью циркуляция тока нулевой последовательности возможна и в обмотке II, если в сети, электрически связанной с этой обмоткой, обеспечены условия для замыкания этого тока.

Схема замещения нулевой последовательности автотрансформатора, который имеет обмотку, соединенную треугольником, а его нейтраль заземлена наглухо, аналогична схеме замещения нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора, у которого обмотки соединены по схеме $Y_0/Y_0/\Delta$ (рисунок 32в).

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи зависит от сечения проводов, расстояний между фазами, наличия или отсутствия заземленных тросов и других линий, проложенных по той же трассе, и многих других факторов. Поэтому его следует определять расчетным путем в соответствии с методикой приведённой в [10].

Однако, в соответствии с п. 4.2.5.7. [10] при приближенных расчетах токов несимметричных КЗ для ВЛ допускается рассчитывать сопротивления нулевой последовательности по упрощенным выражениям. А именно, по средним значениям отношений сопротивлений нулевой и прямой последовательностей воздушных линий электропередачи, приведенным в таблице 7.

Таблица 7 - Средние значения отношения X_0/X_1 для воздушных линий электропередачи.

Характеристика линии	X_0/X_1
Одноцепная линия без заземленных тросов	3,5
То же, со стальными заземленными тросами	3,0
То же, с заземленными тросами из хорошо проводящих материалов	2,0
Двухцепная линия без заземленных тросов	5,5
То же, со стальными заземленными тросами	4,7
То же, с заземленными тросами из хорошо проводящих материалов	3,0

Сопротивление нулевой последовательности кабелей зависит от характера их прокладки, наличия или отсутствия проводящей оболочки, сопротивления заземлений проводящей оболочки (если она имеется) и других факторов. При приближенных расчетах токов несимметричных КЗ допустимо принимать $X_0 = (3,5 \div 4,5)X_1$ и $R_0 = 10R_1$.

При выполнении расчетов в настоящей практической работе допускается использование приближенных методов расчета элементов схем замещения.

Порядок расчета ТКЗ В ПВК RastWin

1. Для создания нового файла для расчетов несимметричных режимов необходимо воспользоваться командой «Новый» в меню «Файлы» и выбрать в диалоговом окне тип файла «динамика.rst». (рисунок 36).

Исходные данные представляют собой параметры схемы замещения прямой, обратной, и нулевой последовательности, по узлам, ветвям и генераторам.

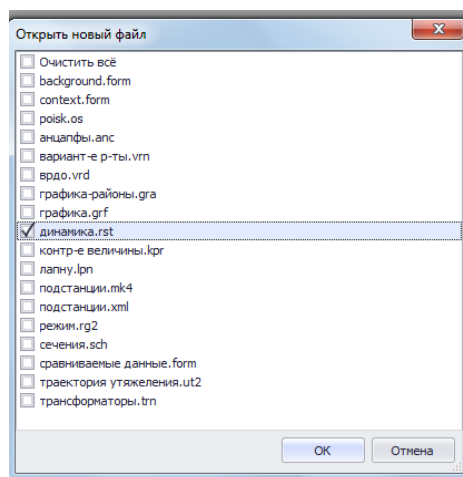


Рисунок 33 - Загрузка шаблона для расчёта несимметричных режимов.

2. Все исходные данные (ИД) вводятся в таблицы Узлы/Несим/ИД, Ветви/Несим/ИД, Генератор/Несим, которые находятся во вкладке Открыть/Несиметрия (рисунок 34).

Исходные данные задаются с помощью стандартного табличного ввода ПВК RastWin. Параметры схем замещения вводятся в именованных единицах.

Для генераторов нужно указать номер агрегата «N агр» и номер узла «N узла», к которому присоединен агрегат. Колонку ЭДС генератора, для расчета ТКЗ «Е» заполняем значениями, полученными в результате соответствующего расчёта.

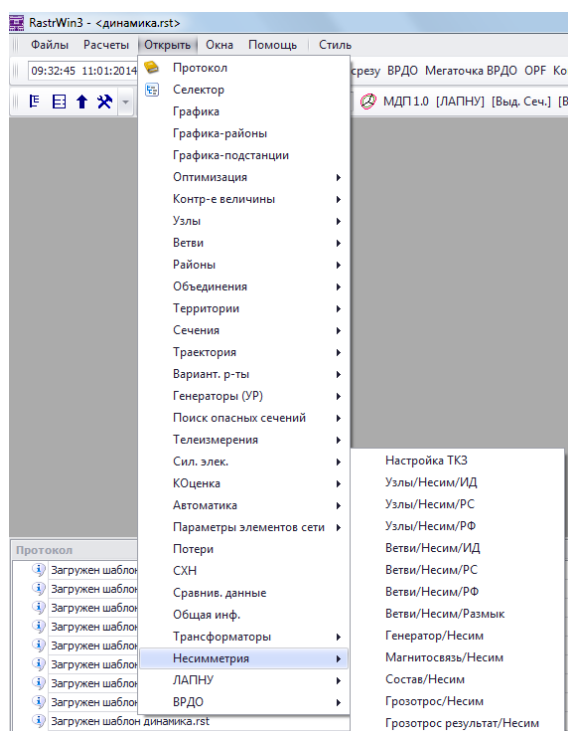


Рисунок 34 – Открытие вкладки для моделирования несимметричных режимов.

3. В таблице «Состав/Несим» (рисунок 35) задаётся точка несимметрии, тип несимметрии.

S	№	№ сост	Тип	П 1	П 2	П 3	I 1	dI 1	r1	x1	I 2	dI 2
1	1	1	3ф	2			6,8560	-46,00			0,0000	
2	2	1	1ф	2								

Рисунок 35 – Таблица «Состав/Несим».

В колонках «№» и «№ сост» указываем номер несимметрии и номер составляющей несимметрии. В колонке «Тип» предлагается выбрать вид короткого замыкания (трёхфазное, двухфазное, однофазное). Для указания места короткого замыкания используем колонку «П1», в ней задается номер узла в котором произойдет несимметрия.

4. Выполняется расчёт ТКЗ в точке № 1 нажатием кнопки .

5. Результаты расчёта переносятся на графическую схему. Для этого открывается окно для рисования графической схемы как для расчётов установившихся режимов (Открыть/Графика). Формируется стандартная графика сети. Далее запускается макро команда: «Расчёты/Выполнить/ТКЗ/Настроить графику для ТКЗ» (рисунок 36).

После преобразования графическая схема сохраняется в формате *.grf. Вид схемы с результатами расчёта ТКЗ приведён на рисунке 37.

При тестовом изучении функций программы, не требующем точных расчётов, предусмотрена возможность применения макрокоманды для формирования параметров схем замещения обратной и нулевой последовательностей.

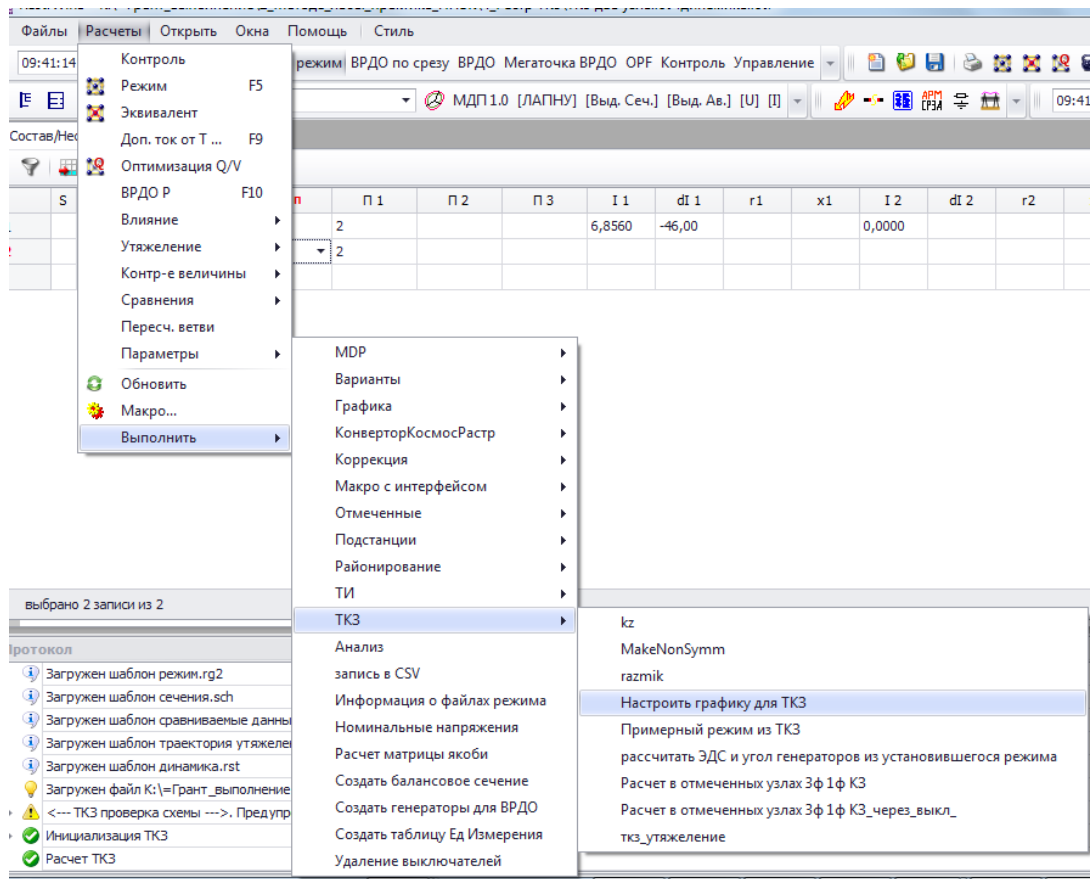


Рисунок 36 – Создание графической схемы для ТКЗ.

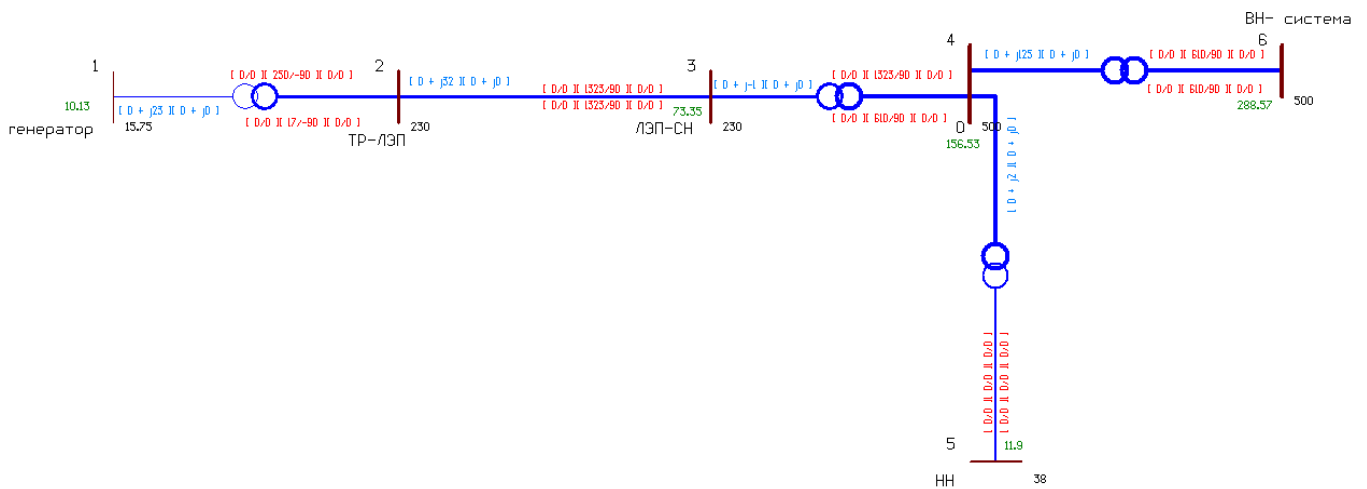


Рисунок 37 – Вид графической схемы в ПВК RastWin с результатами расчёта ТКЗ.

Макрос генерации приблизительных данных последовательностей, находится в директории «масго» и называется «MakeNonSym.rbs». Он работает в автоматическом режиме и не требует настройки. Данный макрос можно запустить через меню Расчёты/Выполнить/ТКЗ/«MakeNonSym (рисунок 38).

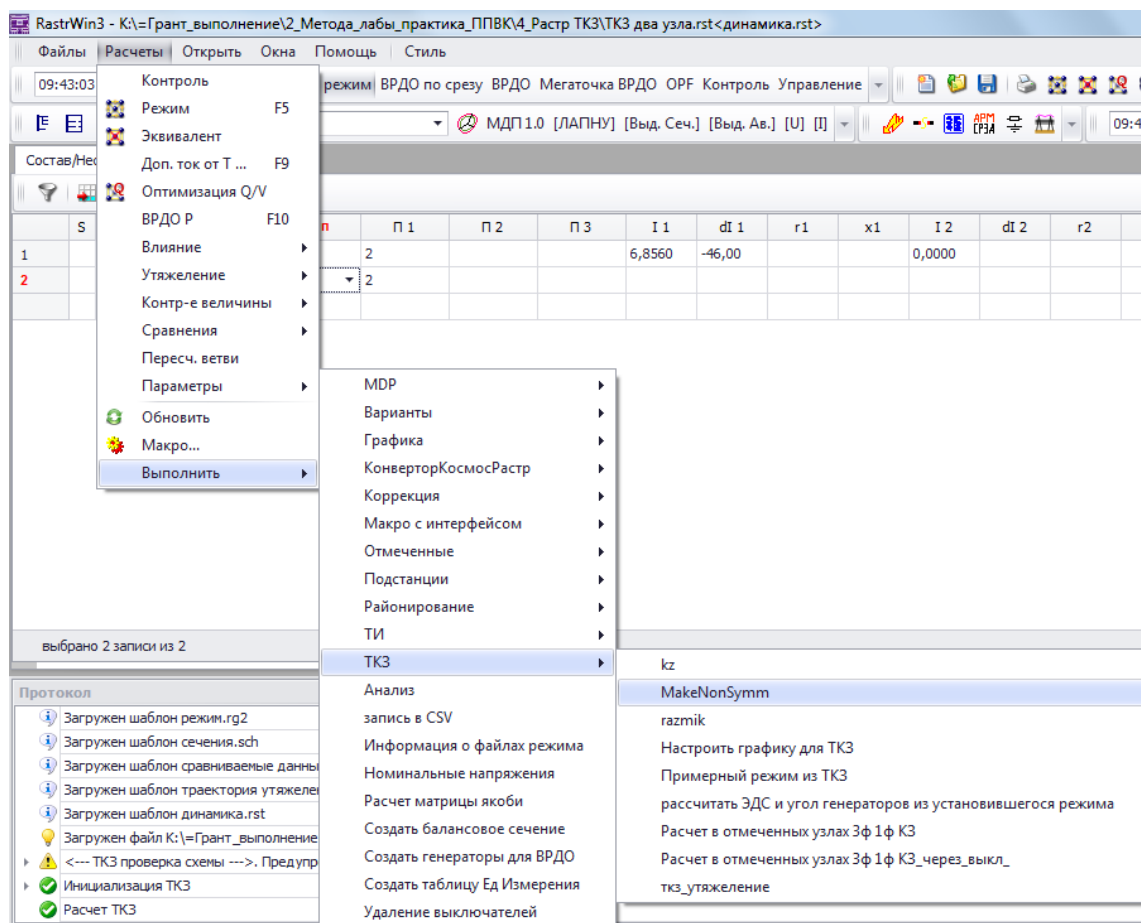


Рисунок 38 – Запуск макроса генерации приблизительных данных по нулевой и обратной последовательностям.

ПЕРЕЧЕНЬ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

Для выполнения практической работы необходимо: ПК с установленным программным комплексом RastrWin 3 или RastrKZ и с любым средством для расчёта параметров моделей элементов ЭЭС (MS Excel, Mathcad).

ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Составляется однолинейная схема электрической сети, для которой будет выполняться расчёт ТКЗ (оформление по ГОСТ АмГУ).
2. Составляются схемы замещения для расчёта токов КЗ и рассчитываются их параметры.
3. В RastrWin 3 вводятся необходимые данные по узлам (Узлы/Несим/ИД), ветвям (Ветви/Несим/ИД) и генераторам (Генератор/Несим)

для расчёта токов КЗ. Расчётный файл сохраняется с расширением *.rst (динамика).

4. Выбирается точка КЗ и тип несимметрии (Состав/Несим) по заданию преподавателя.

5. Результаты переносятся на графическую схему. Для этого составляется графическая схема для расчёта режимов (Открыть/Графика). Далее запускается макро команда: Расчёты/Выполнить/ТКЗ/Настроить графику для ТКЗ. После преобразования графическая схема сохраняется в формате *.grf.

6. Результаты по рассчитанным токам КЗ оформляются в сводную таблицу.

ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ

В отчёте по практической работе необходимо представить однолинейную схему электрической сети, для которой выполнен расчёт ТКЗ, схему замещения с рассчитанными параметрами, таблицы с заданными параметрами «Узлы/Несим/ИД», «Ветви/Несим/ИД», «Генератор/Несим», «Состав/Несим», «Узлы/Несим/РС», «Ветви/Несим/РС», а так же графические схемы из ПВК RastrWin с результатами расчётов для каждого вида КЗ (четыре случая).

ВЫВОДЫ

В результате выполнения практической работы закрепляются практические навыки по расчёту параметров схем замещения элементов ЭЭС для расчёта токов КЗ, осуществляется закрепление знаний по расчёту ТКЗ в ПВК RastrWin 3.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

1. Каковы цели расчета КЗ?
2. Какие условия и основные допущения принимают при расчетах КЗ?
3. Какие функции заложены в модуль RastrWinKZ?
4. В каких единицах задаются данные в RastrWinKZ для расчёта ТКЗ?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блок, В. М. Электрические сети и системы: Учебник для вузов. / В. М. Блок. – М.: Высшая школа, 1986 – 430 с.
2. Гераскин, О.Т. Проблема расчета режимов в больших электроэнергетических системах и ее решение методами диакоптики и декомпозиции / О.Т. Гераскин. - Проблемы энергетики, 2000. – № 1-2. – С. 63-77.
3. Гончарюк, Н.В. Методические и программные средства формирования расчетных схем объединенных энергосистем на базе современных технологий / Н.В. Гончарюк, В.И. Фролов. – Электричество, 2003. - № 5. — С. 3-12.
4. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство. / Ю. С. Железко. – М. : НЦ ЭНАС, 2009 – 456 с.
5. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. / В.И. Идельчик. – М: Энергоатомиздаг, 1989 – 594 с.
6. Неуймин, В. Г. Программный комплекс «RastrWin3». Руководство пользователя / В.Г. Неуймин, Е. В.Машалов, А.С. Александров, А.А.Багрянцев – Екатеринбург, 2013. – 266 с.
7. Поспелов, Г.Е. Электрические системы и сети. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп./Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин – М.: Выш. шк., 1988. – 308 с.
8. Программные комплексы RastrWin, Bars, Lincor, Rustab, RastrKZ, RastrMDP [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.rastrwin.ru/rastr/RastrHelp.php>. – 15.09.2022.
9. ПУЭ 6,7 1.1.202. Правила устройства электроустановок 31.10.2005 - 408 с.
10. РД 153-34.0–20.527-98. Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. Издания.; введ. 1998–03–

23. – М.: Департаментом стратегии развития и научно-технической политики ;
М. : Московский энергетический институт, 2000. – 98 с.

11. СО 153-34.20.118-2003. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем.

12. ГОСТ Р 58670-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Планирование развития энергосистем. Расчеты электроэнергетических режимов и определение технических решений при перспективном развитии энергосистем. Нормы и требования" [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://meganorm.ru/Data/723/72397.pdf> - 15.09.2022

13. Хачатрян, В.С. Расчет установившегося режима большой электроэнергетической системы методом диакоптики / В.С. Хачатрян, Н.П. Бадалян. – Электричество, 2003. - №6. - С. 13-17.

14. Файбисович, Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей / Д. Л. Файбисович. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : ЭНАС, 2012. — 376 с.

15. Электронная электротехническая библиотека [Электронный ресурс] : Официальный сайт. – 25.10.2004. – Режим доступа: <http://electrolibrary.narod.ru/9/97.htm> . – 12.11.2014.

16. Электротехнический справочник (Том 3) В.Г. Герасимов, П.Г. Грудинский, В.А. Лабунцов, И.Н. Орлов, М.М. Соколов, А.М. Федосеев, А.Я. Шихин, И.В. Антик - М.: Энергоатомиздат, 1988.-880 с.

Однолинейные схемы электрических сетей для расчётов электрических режимов

Вариант № 1

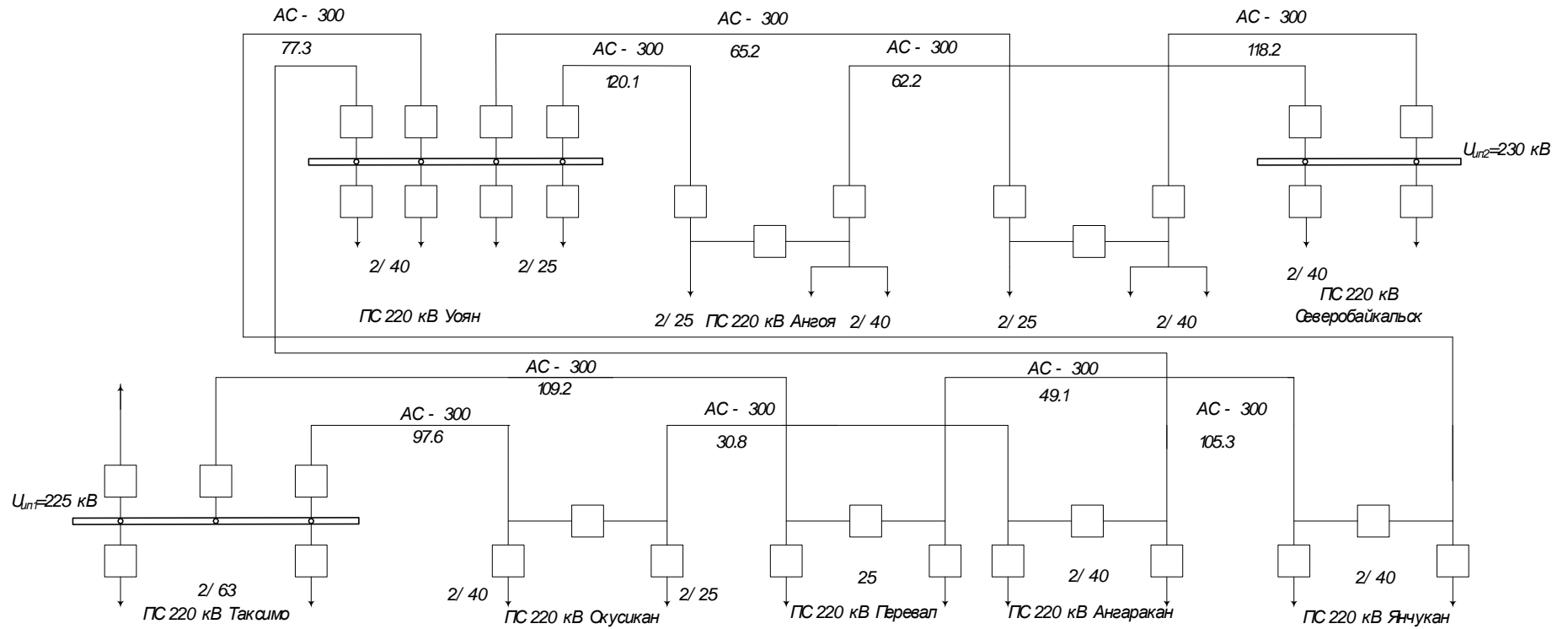


Рисунок П1.1 – Однолинейная схема сети

Вариант №2

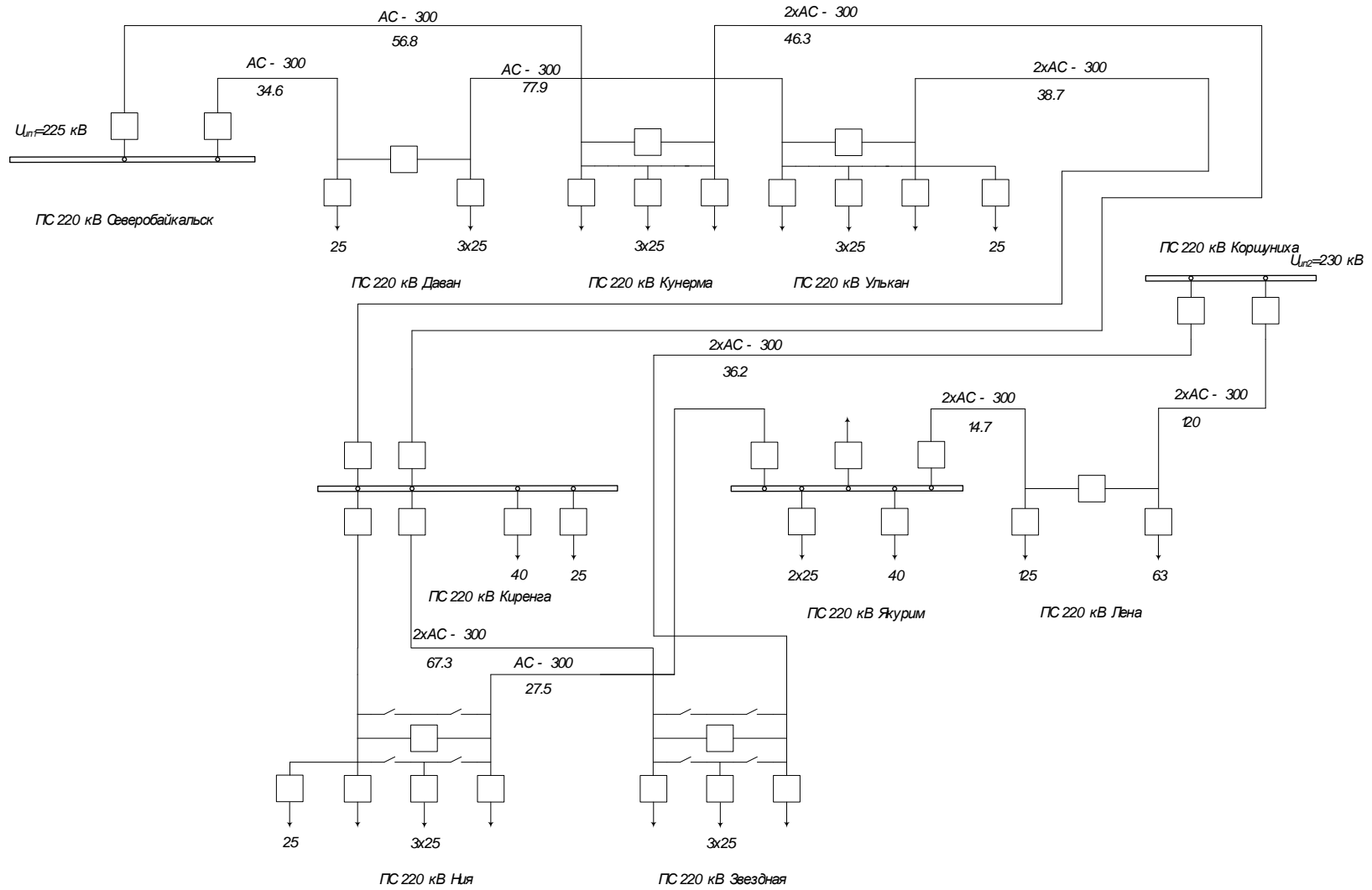


Рисунок П1.2 – Однолинейная схема сети

Вариант № 3

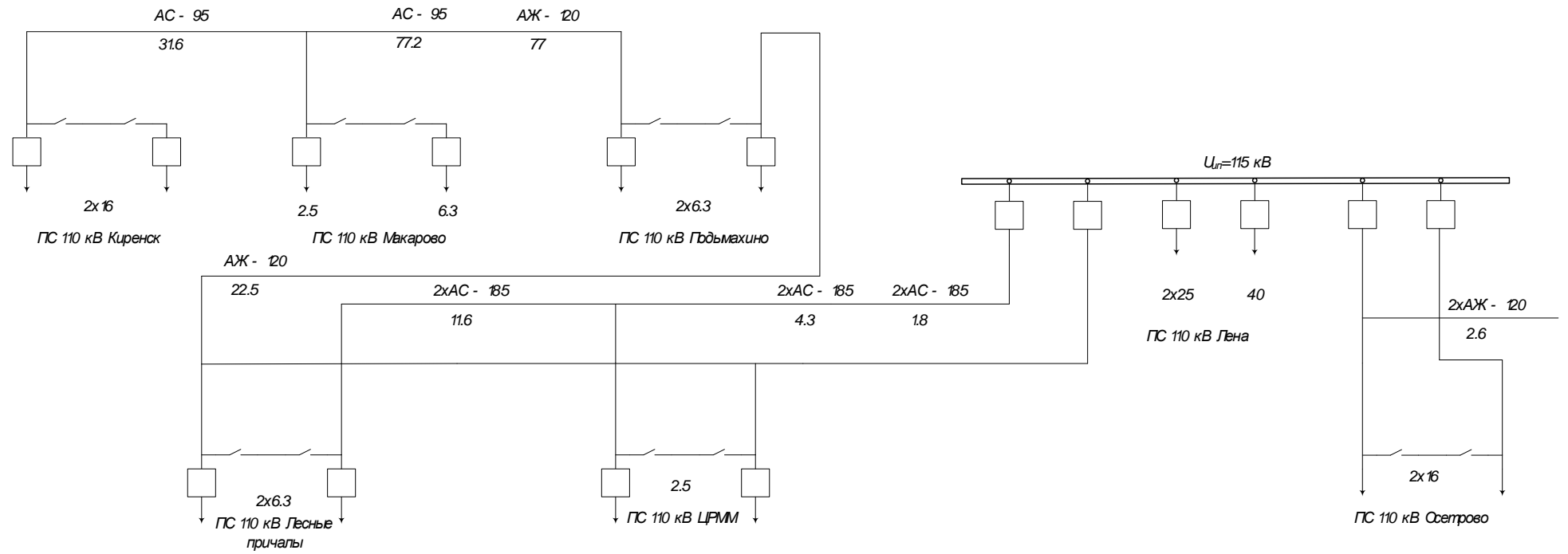


Рисунок П1.3 – Однолинейная схема сети

Вариант № 4

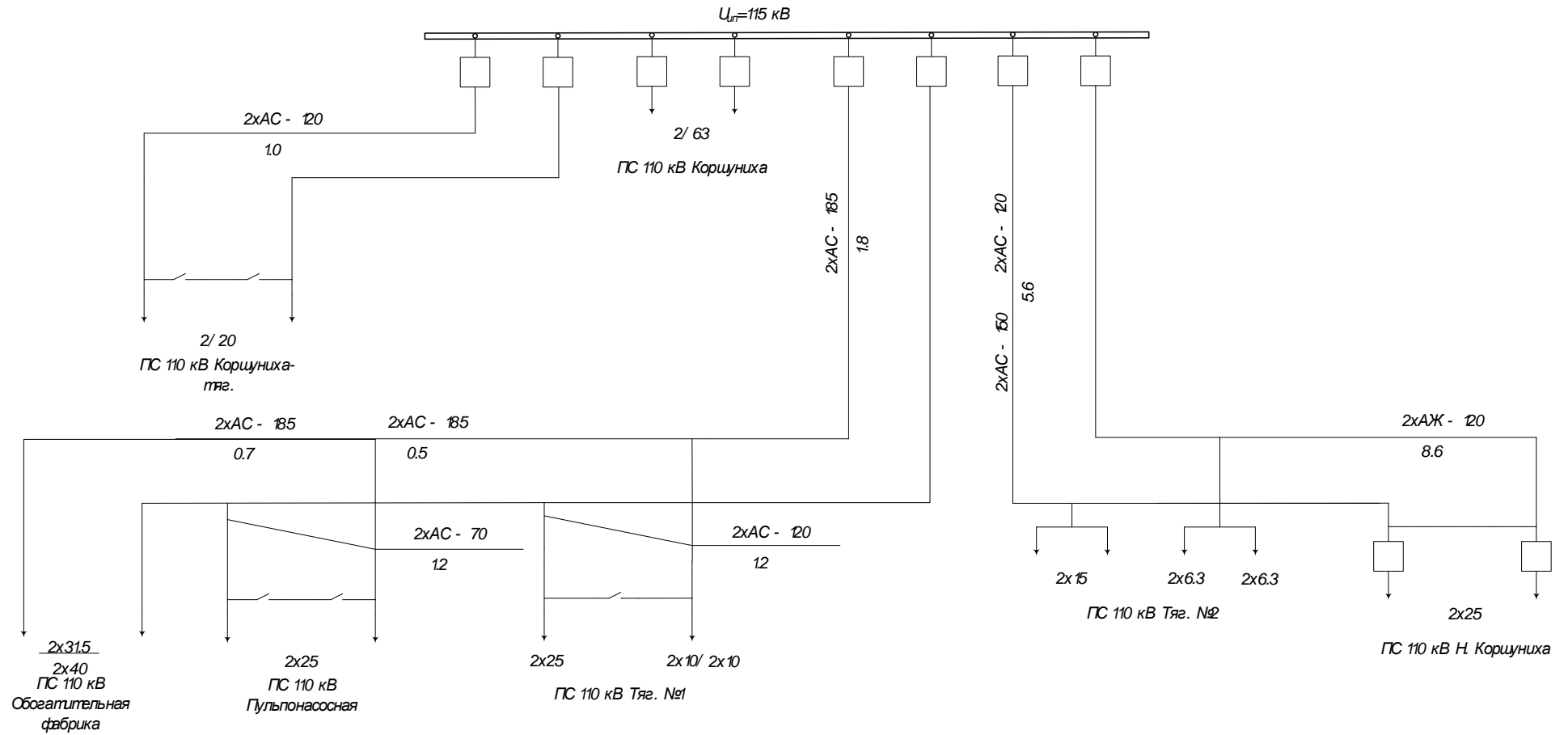


Рисунок П1.4 – Однолинейная схема сети

Вариант № 5

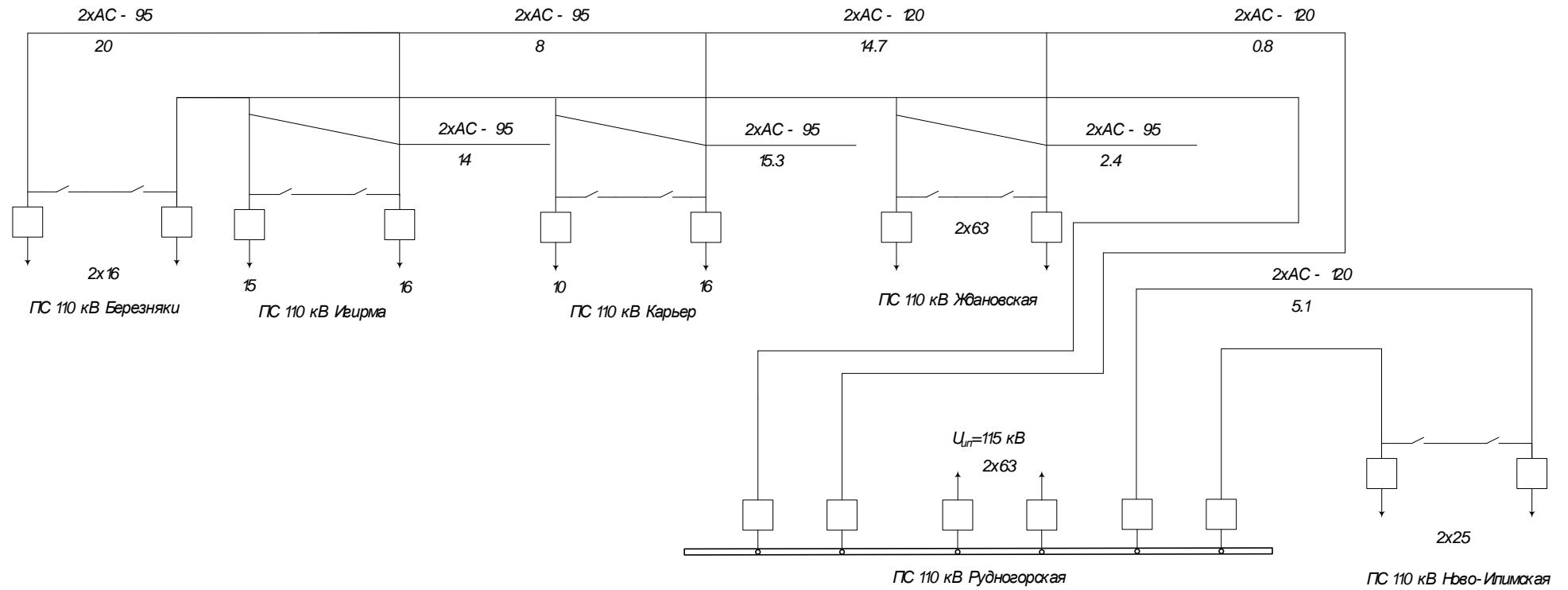


Рисунок П1.5 – Однолинейная схема сети

Вариант № 6

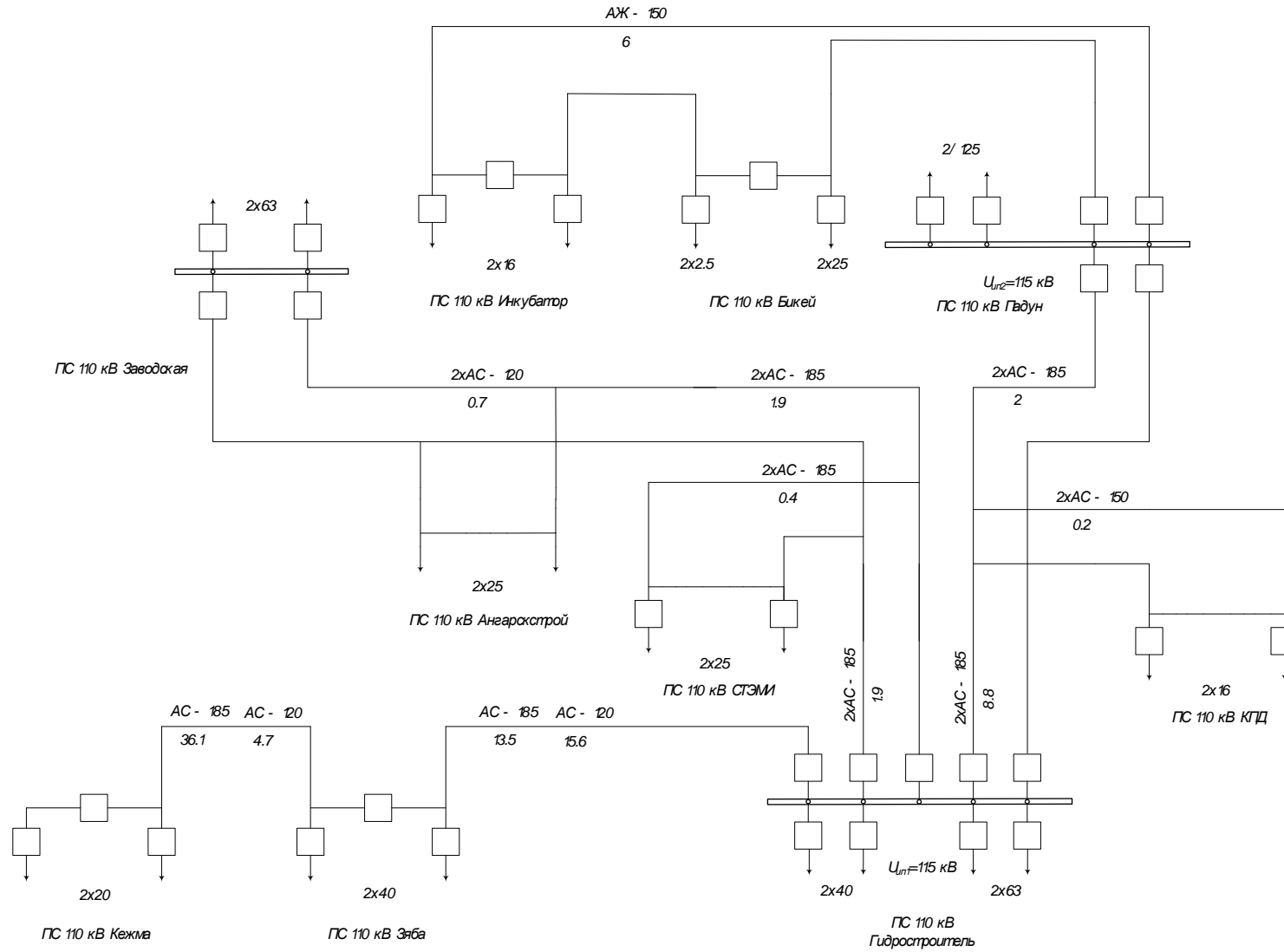


Рисунок П1.6 – Однолинейная схема сети

Вариант № 7

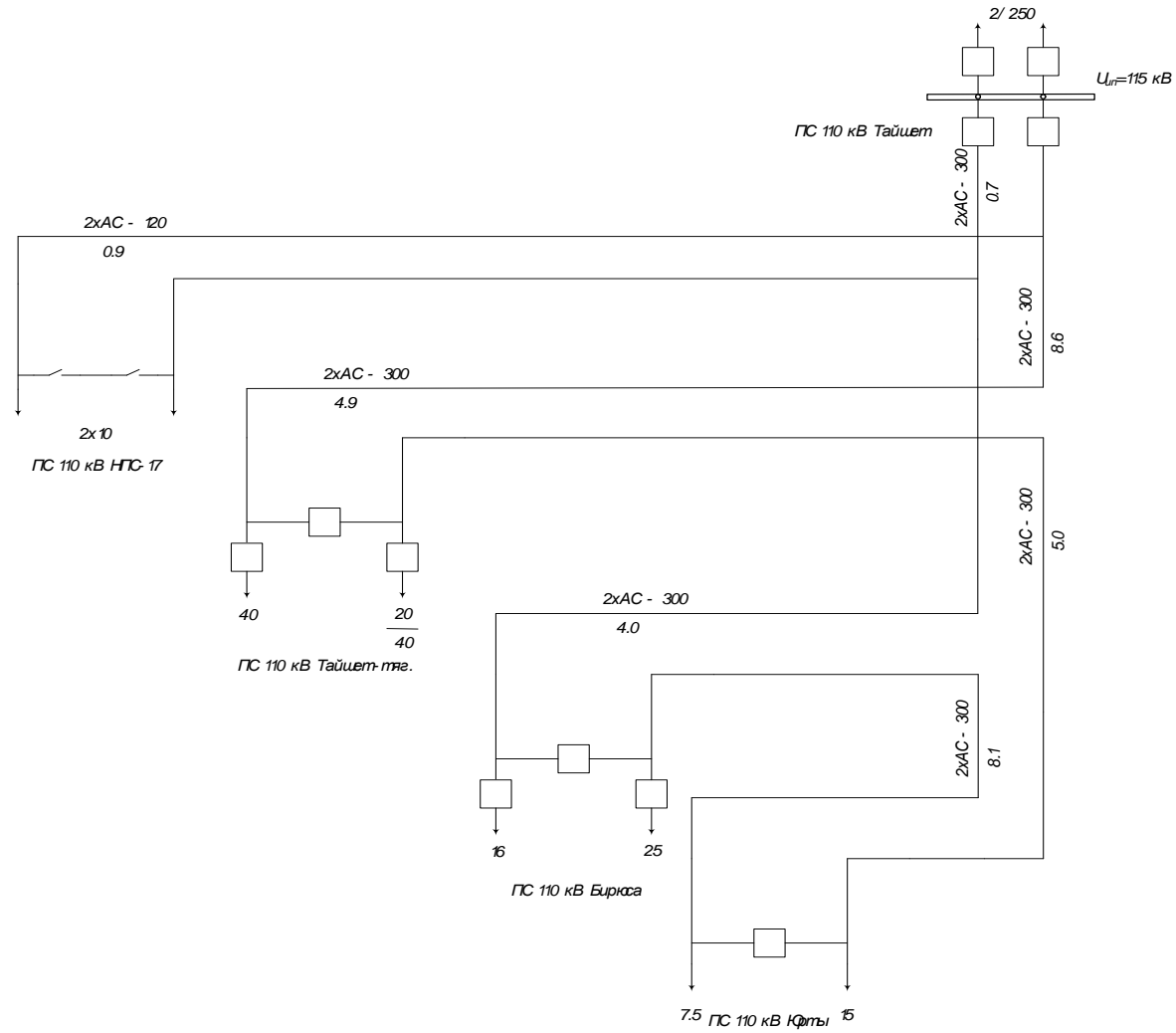


Рисунок П1.7 – Однолинейная схема сети

Вариант № 9

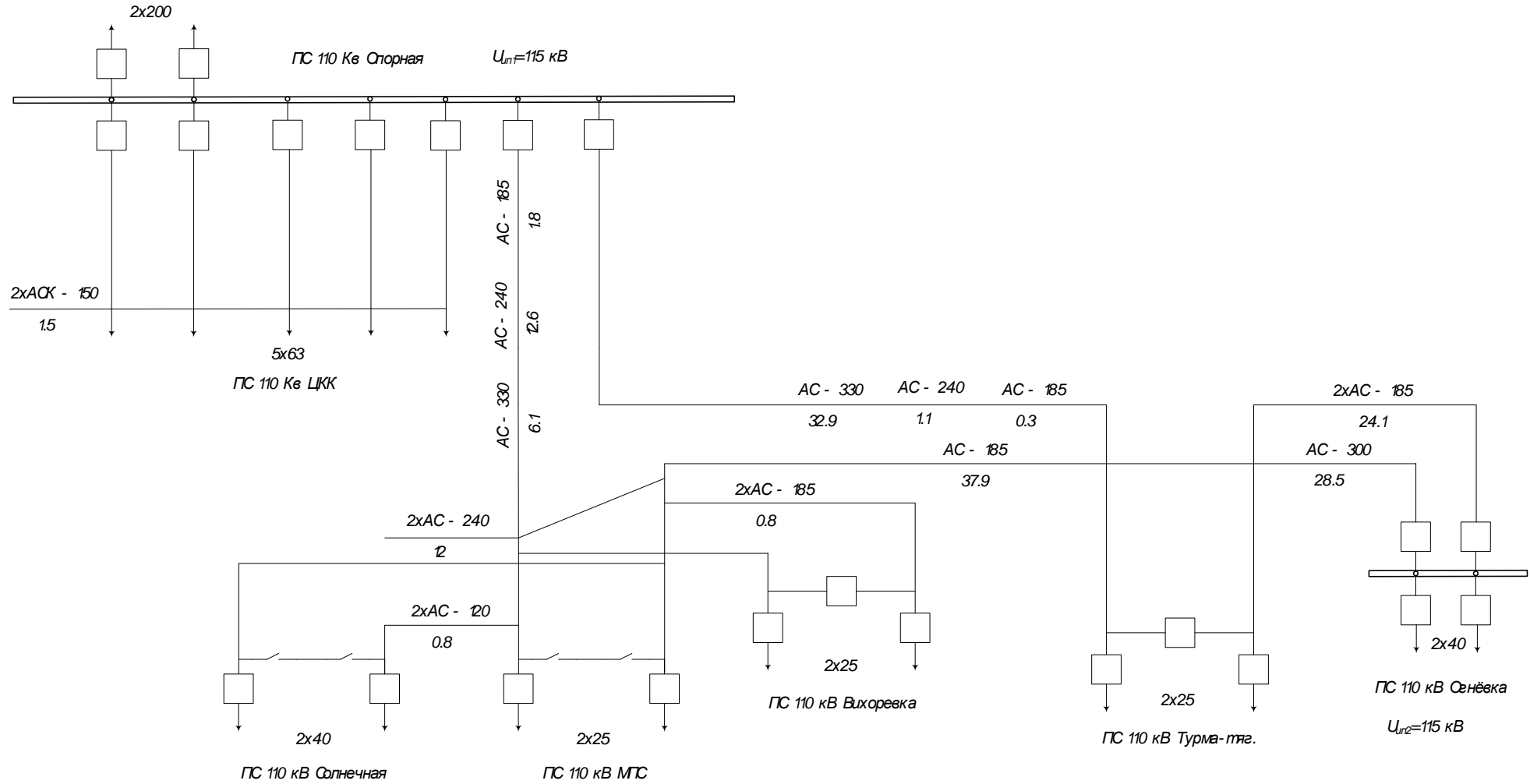


Рисунок П1.9 – Однолинейная схема сети

Вариант № 10

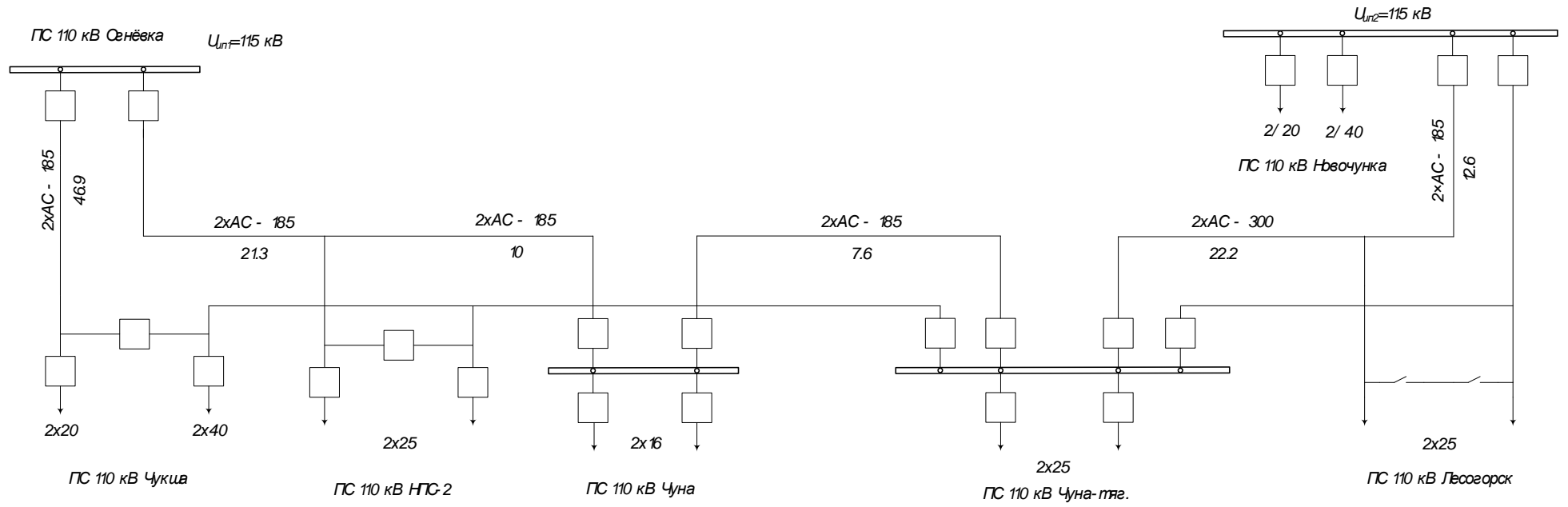


Рисунок П1.10 – Однолинейная схема сети

Вариант №11

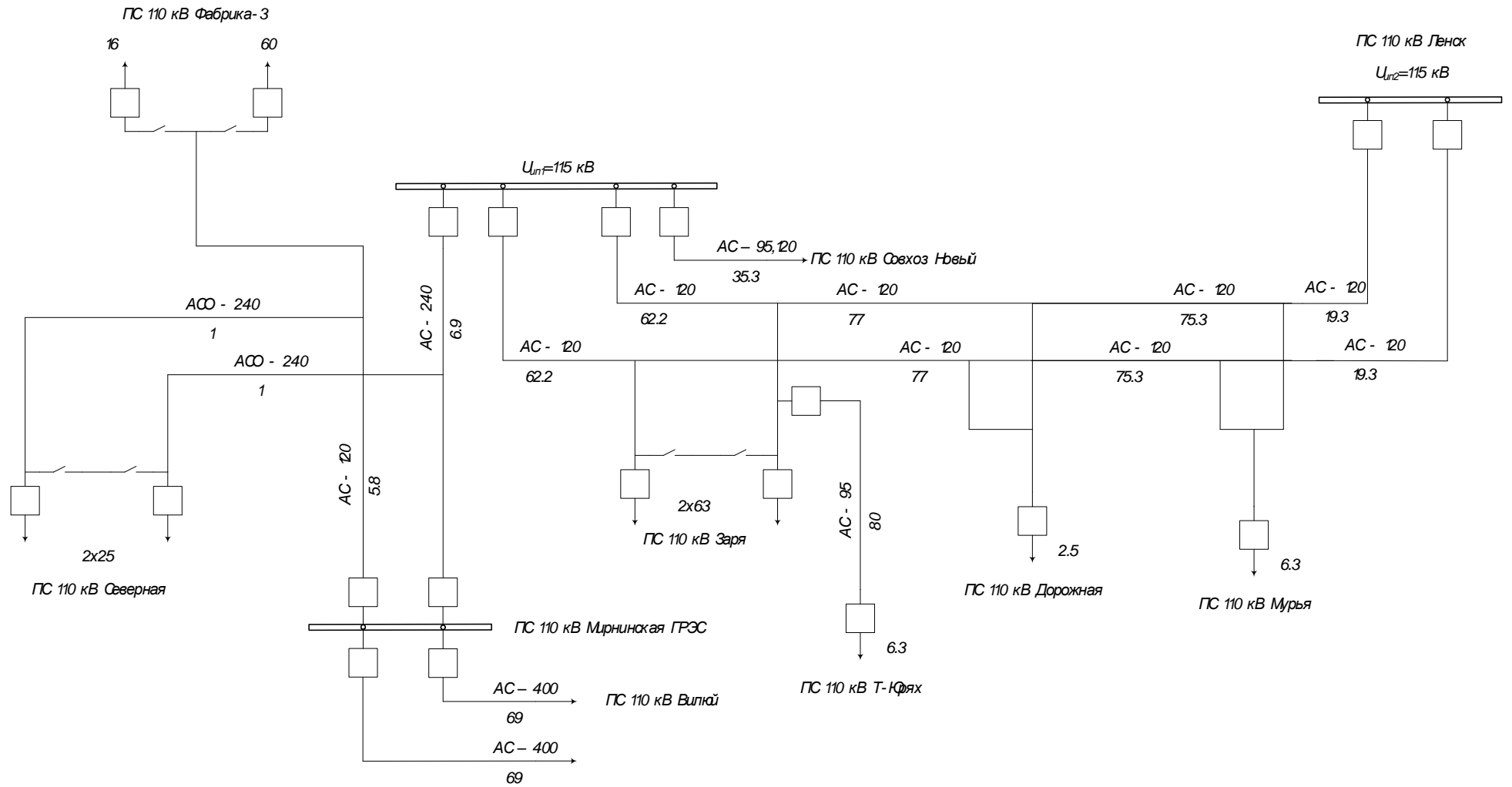


Рисунок П1.11 – Однолинейная схема сети

Вариант № 12

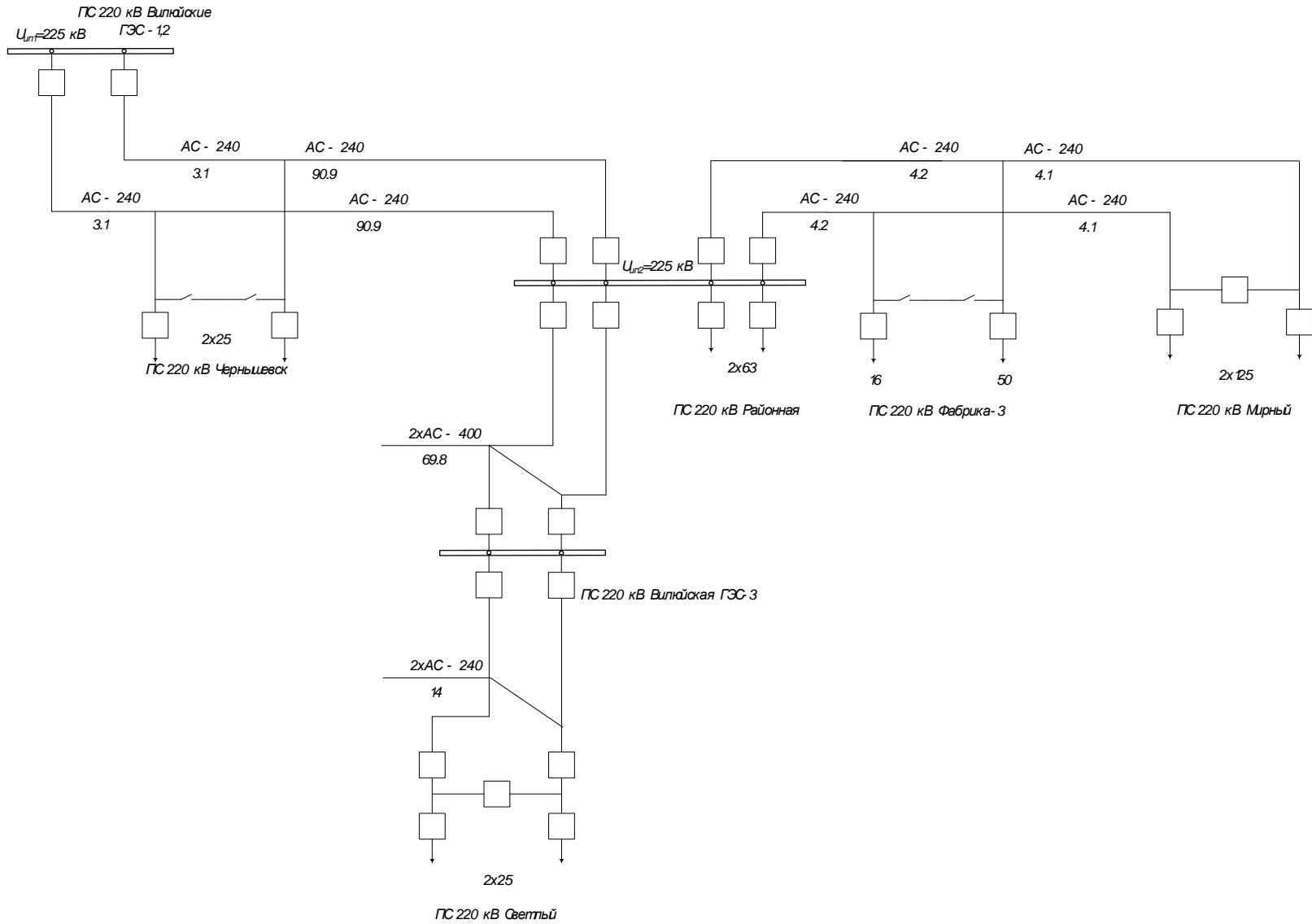


Рисунок П1.12 – Однолинейная схема сети

Вариант № 13

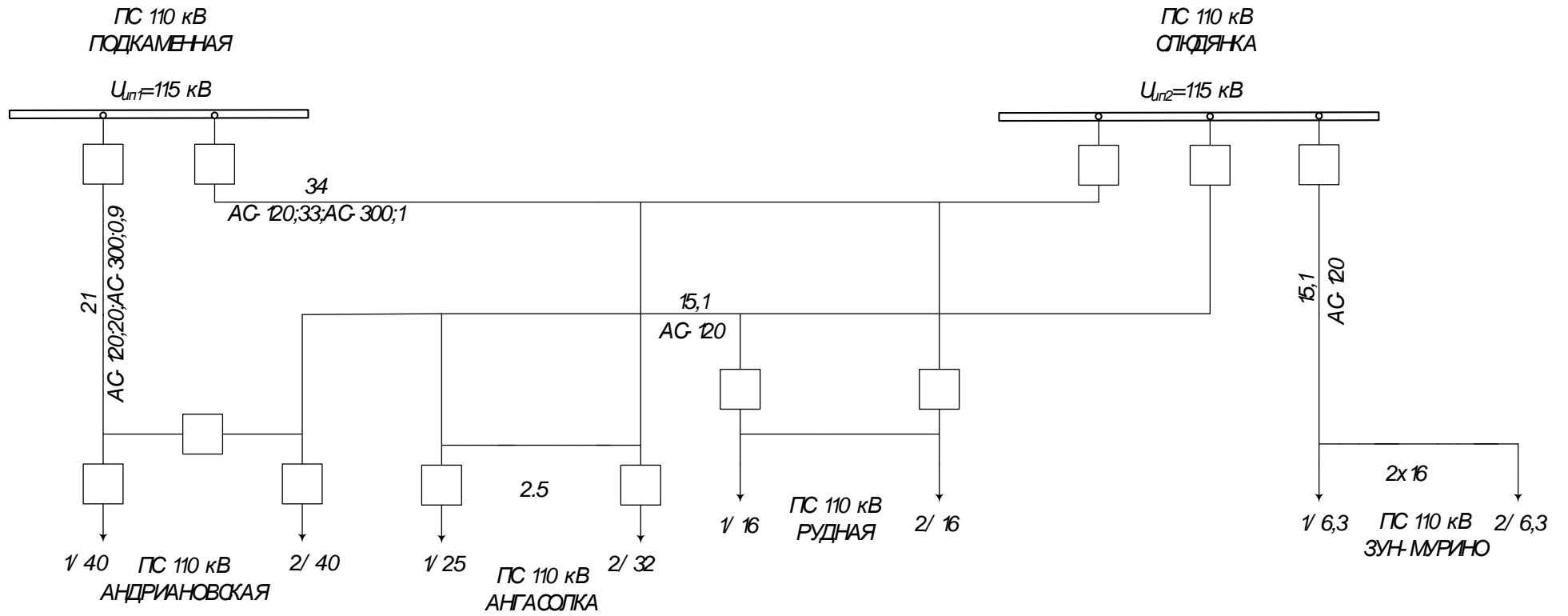


Рисунок П1.13 – Однолинейная схема сети

Вариант № 14

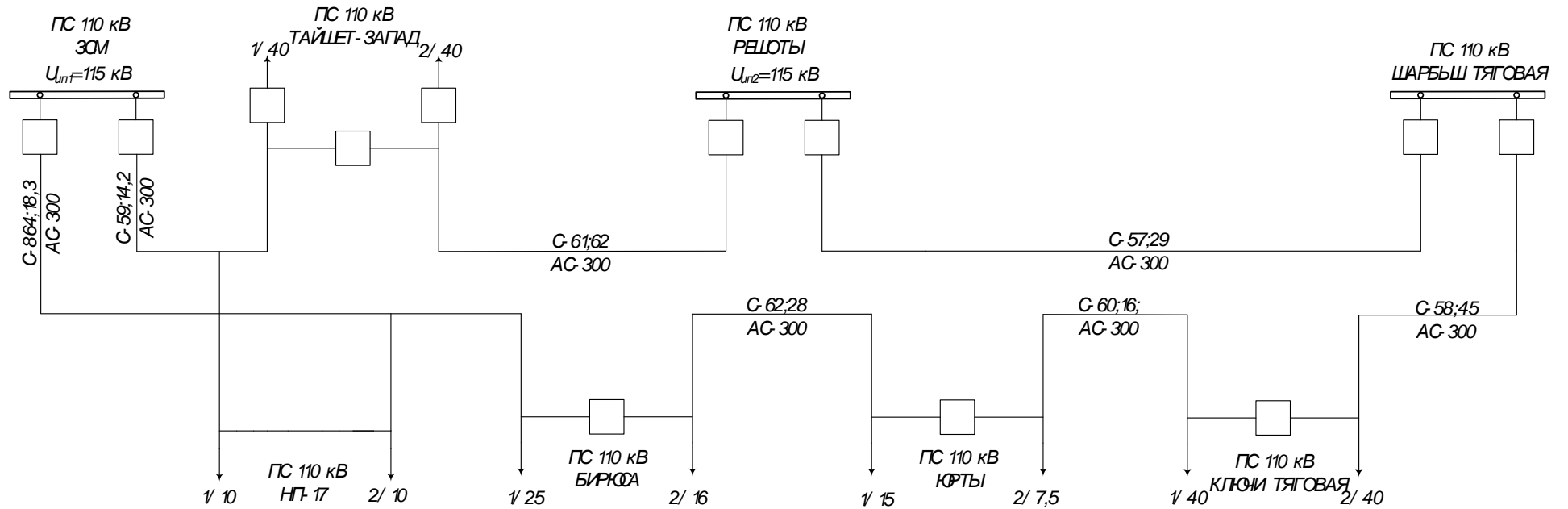


Рисунок П1.14 – Однолинейная схема сети

Вариант № 15

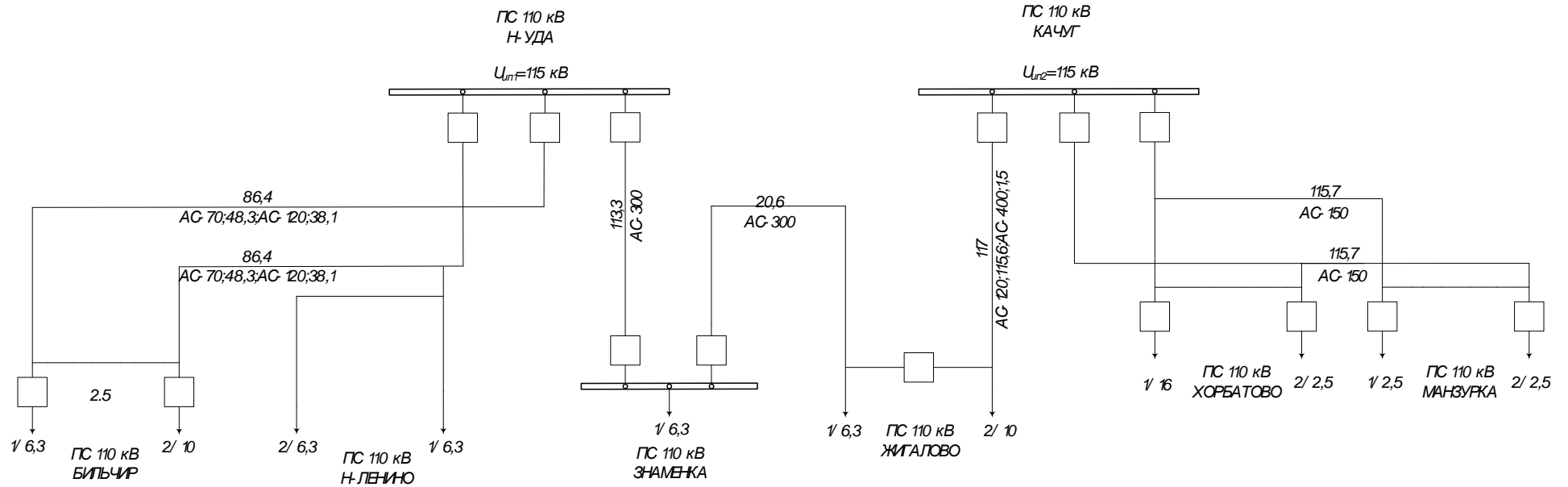


Рисунок П1.15 – Однолинейная схема сети

Вариант № 16

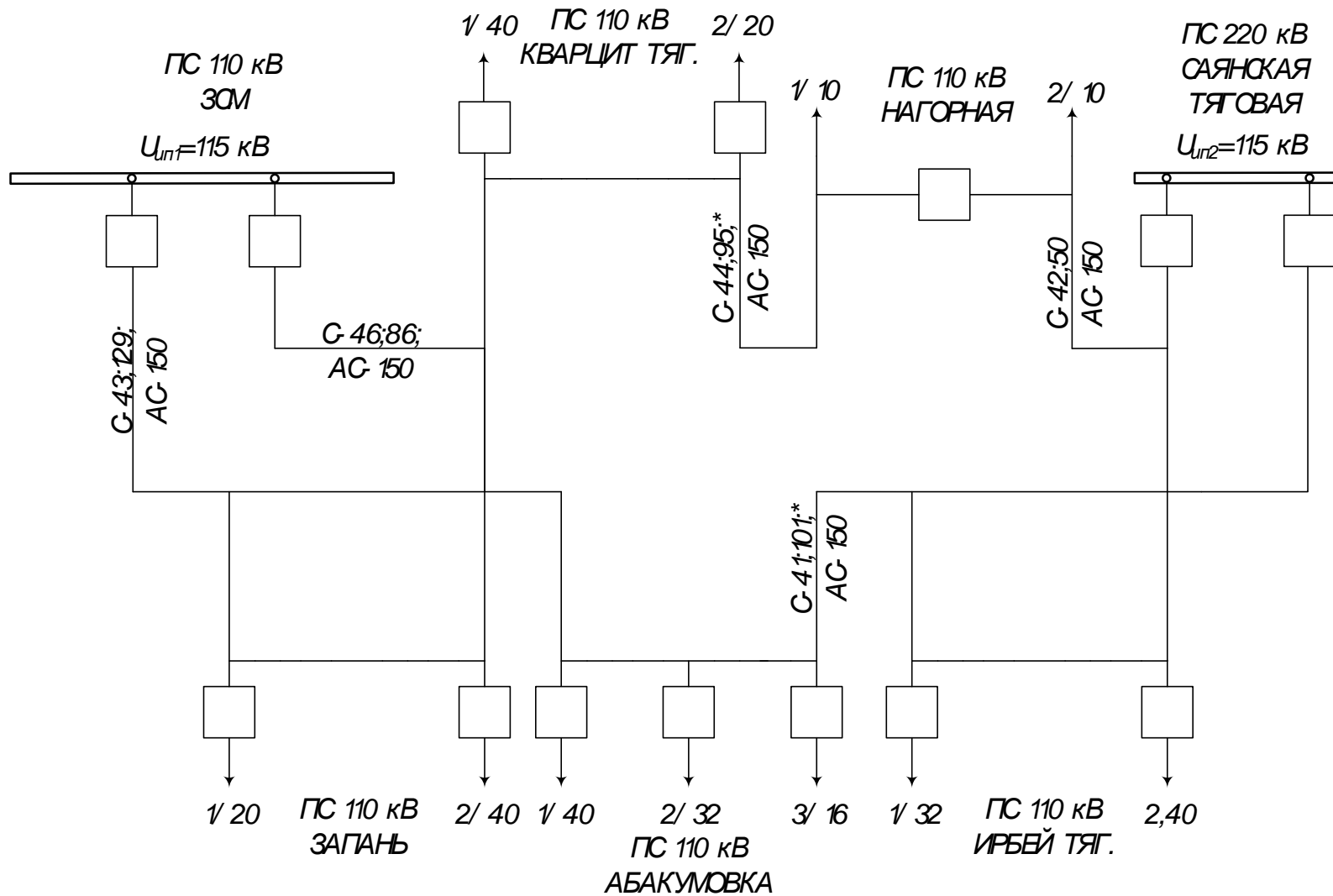


Рисунок П1.16 – Однолинейная схема сети

Вариант № 17

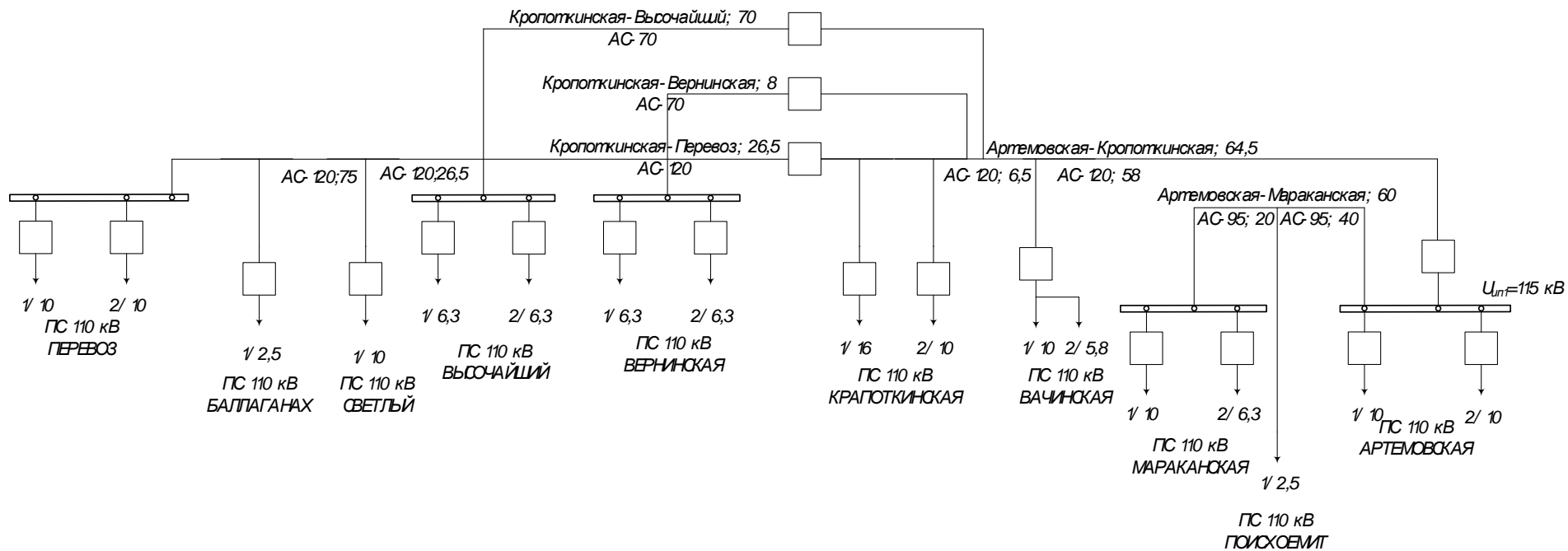


Рисунок П1.17 – Однолинейная схема сети

Вариант № 19

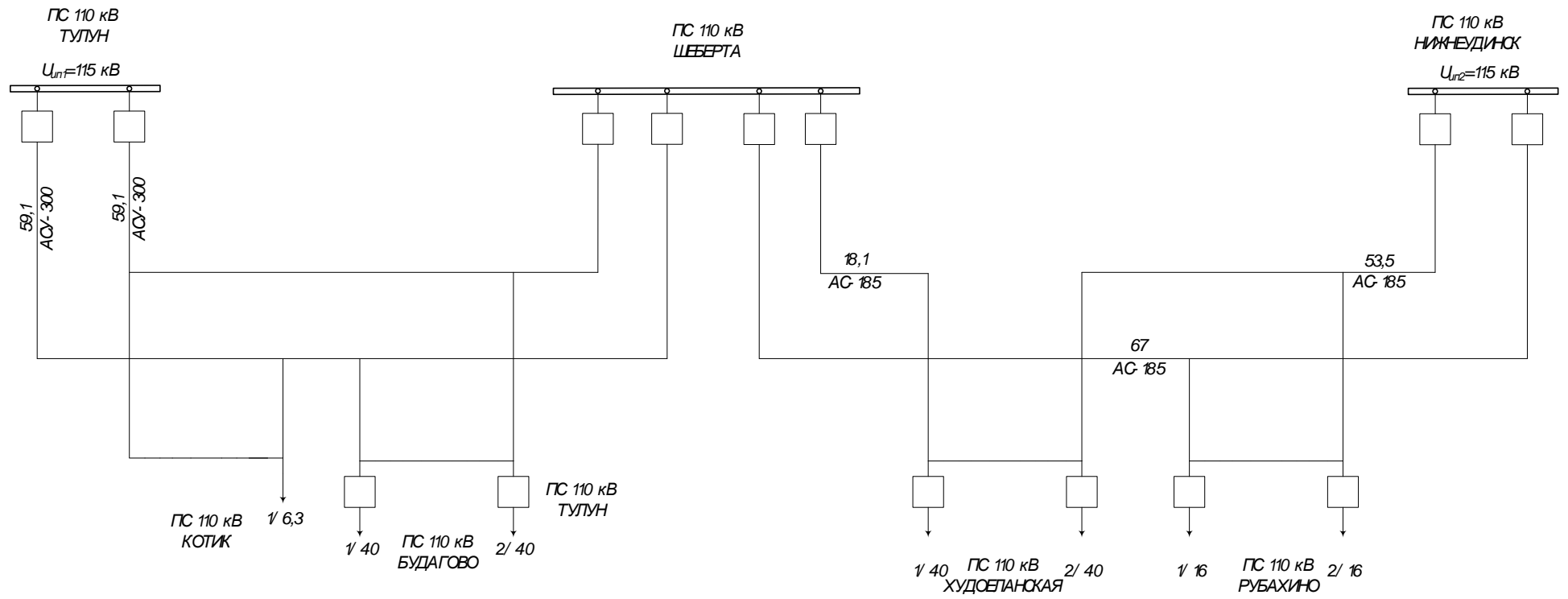


Рисунок П1.19 – Однолинейная схема сети.

Вариант № 20

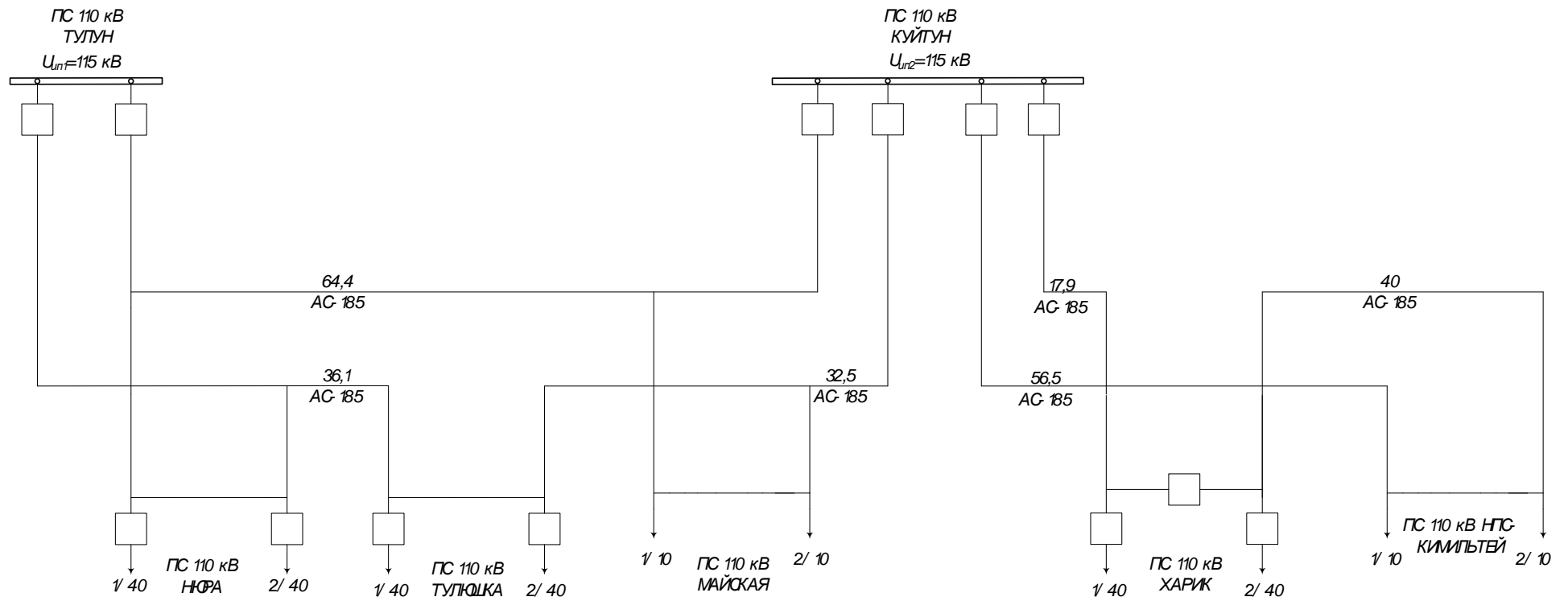


Рисунок П1.20 – Однолинейная схема сети.

Вариант № 21

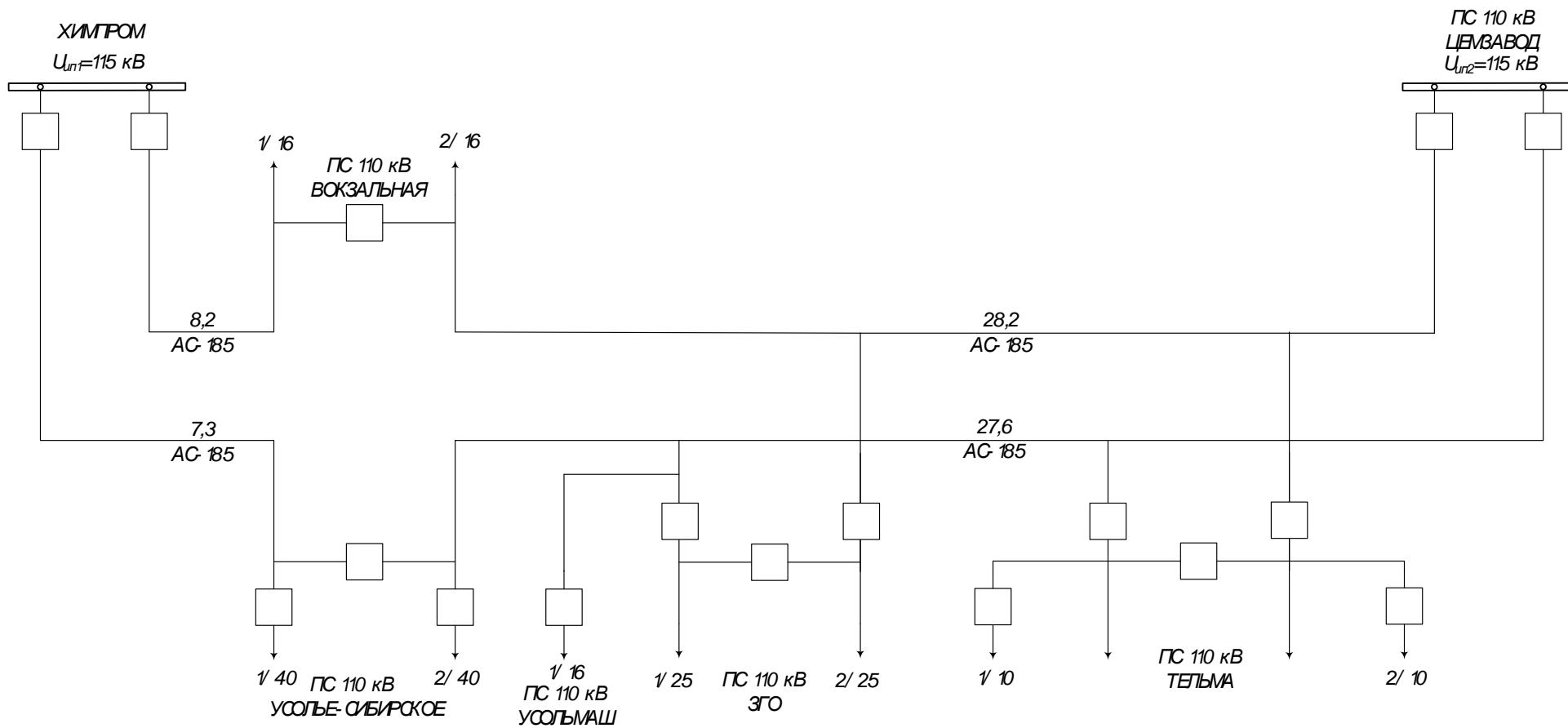


Рисунок П1.21 – Однолинейная схема сети.

Вариант № 22

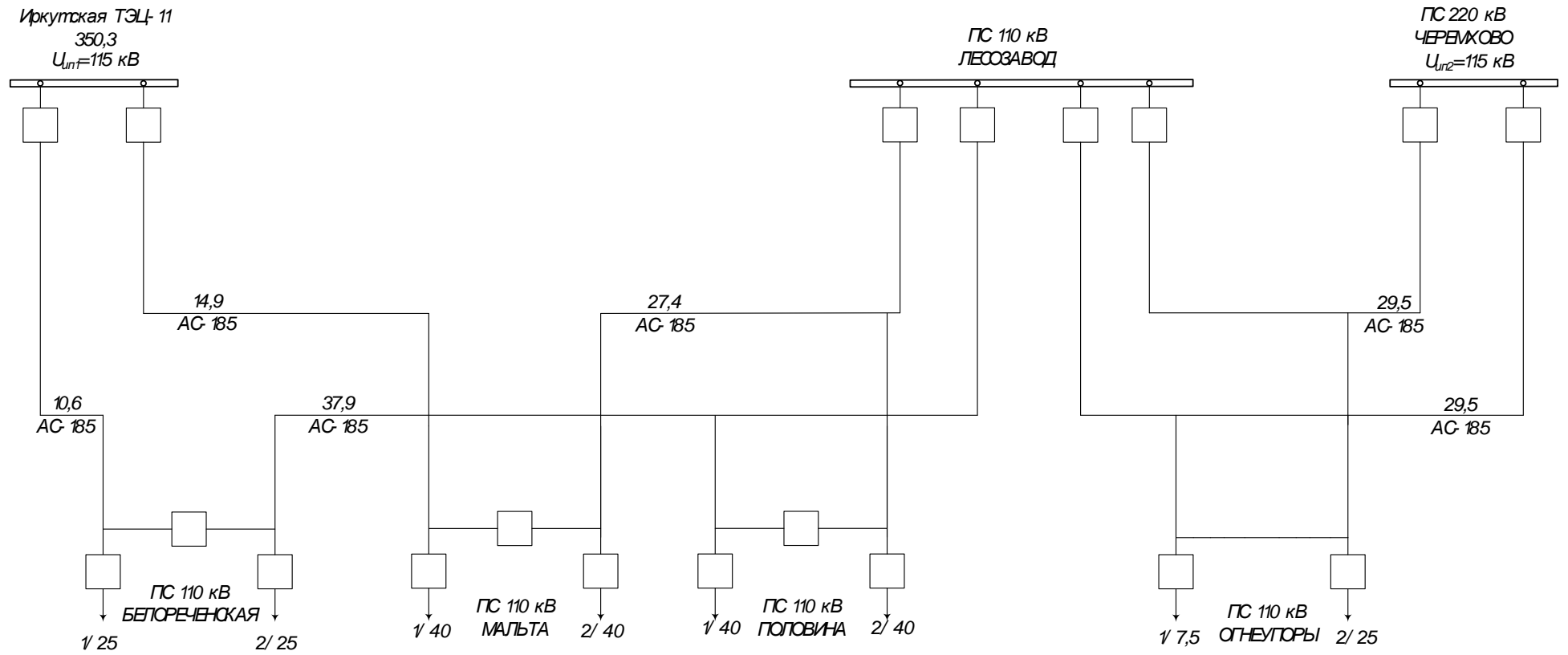


Рисунок П1.22 – Однолинейная схема сети.

Вариант № 23

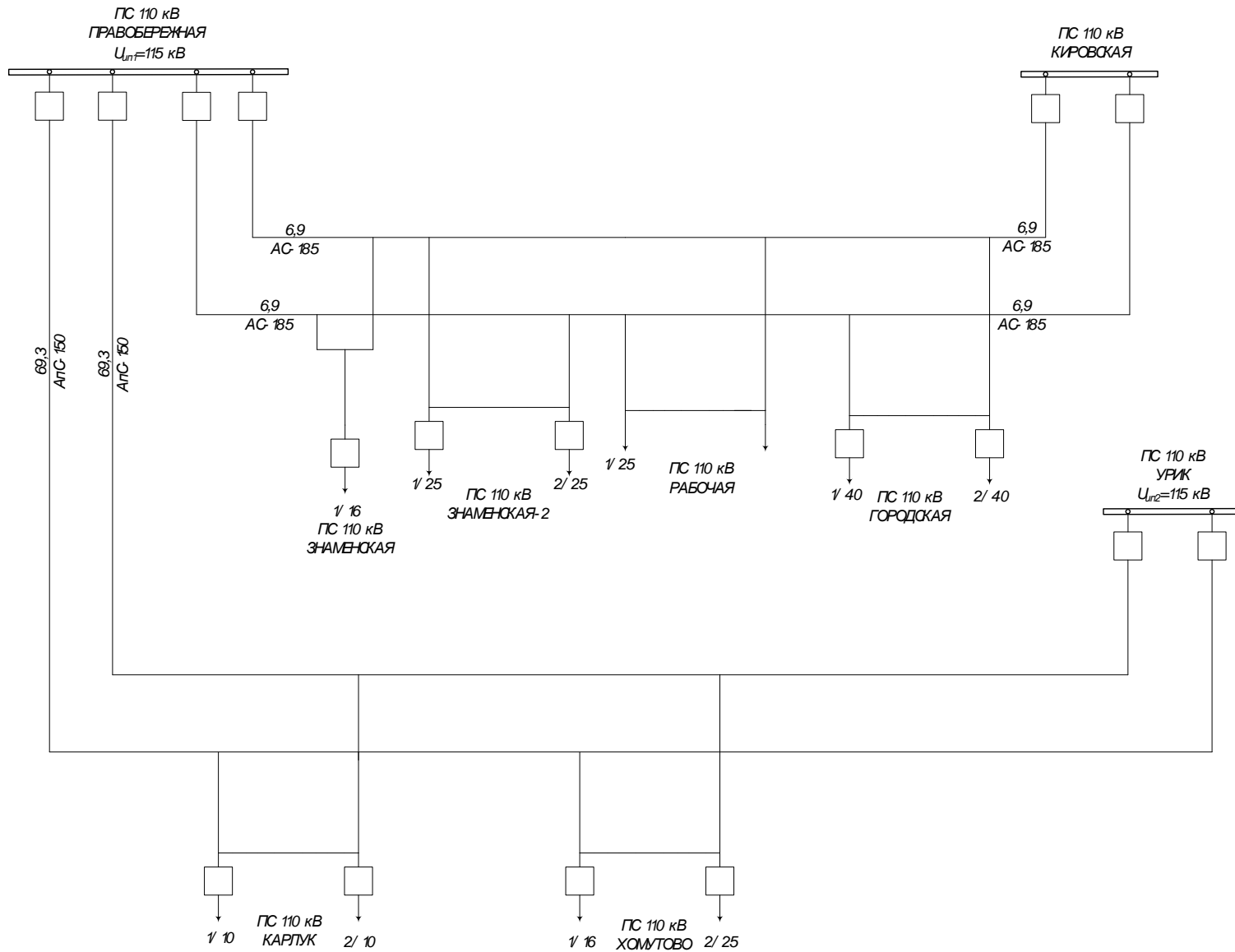


Рисунок П1.23 – Однолинейная схема сети.

Вариант № 24

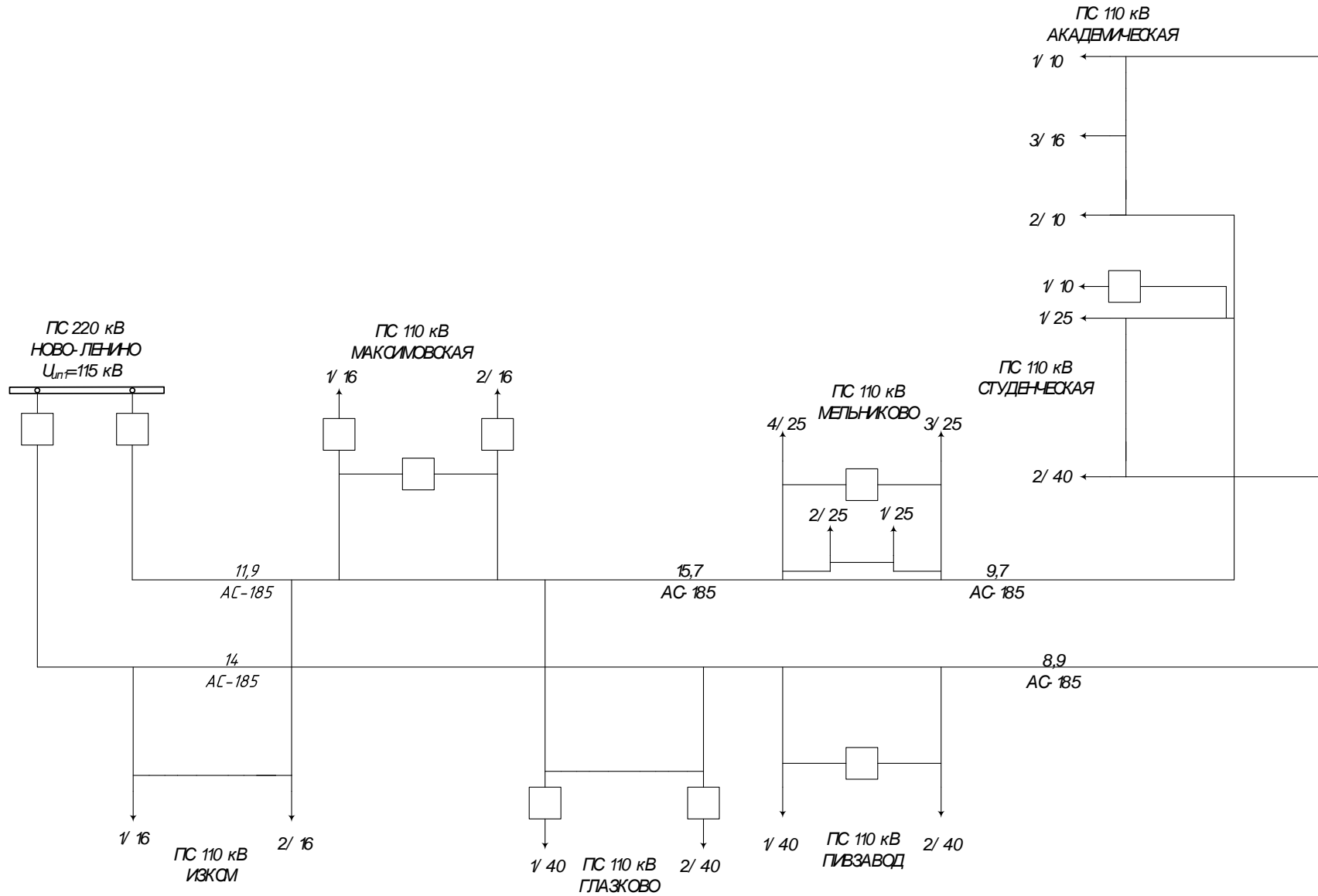


Рисунок П1.24 – Однолинейная схема сети.

Вариант № 25

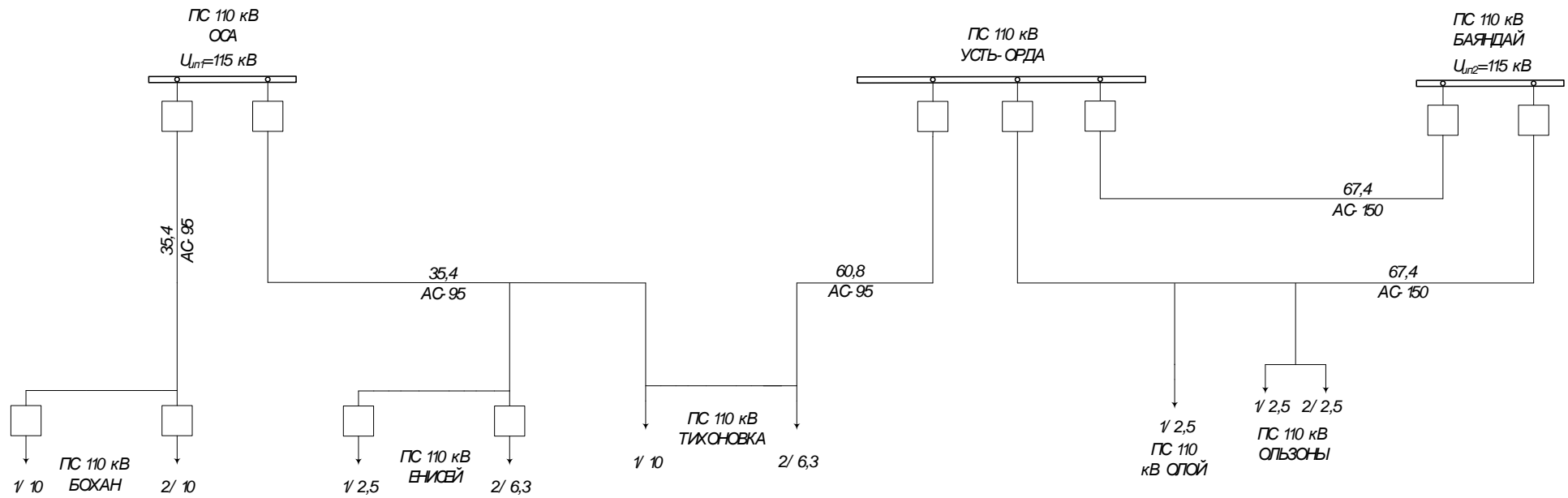


Рисунок П1.25 – Однолинейная схема сети..

Однолинейные схемы электрических сетей для расчётов электрических режимов в сетях с несколькими уровнями напряжений.

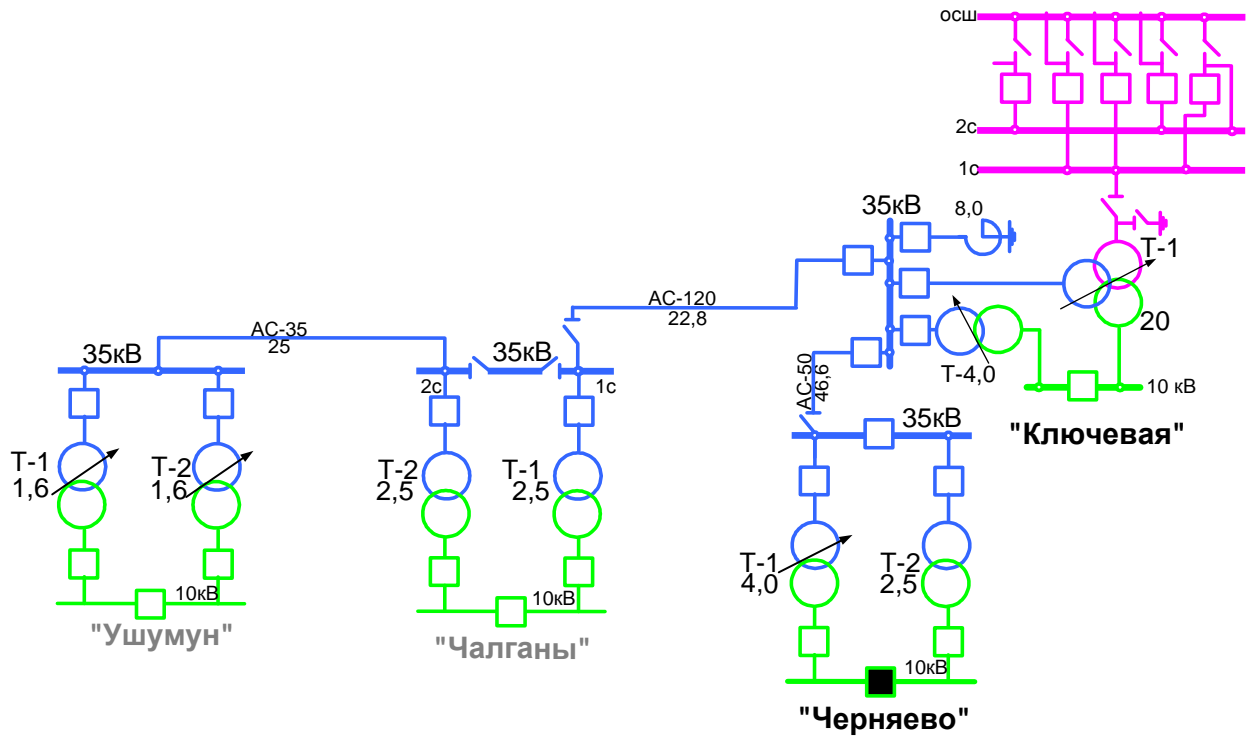


Рисунок П 2.1 - Вариант № 1.

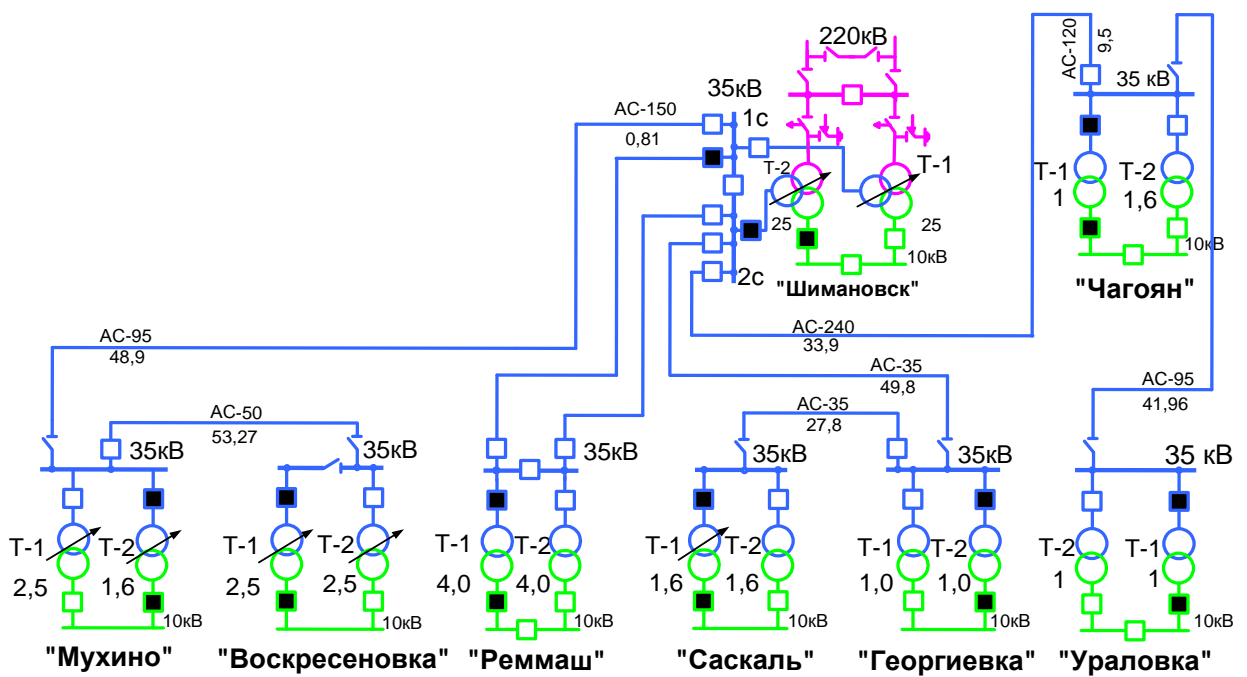


Рисунок П 2.2 - Вариант № 2.

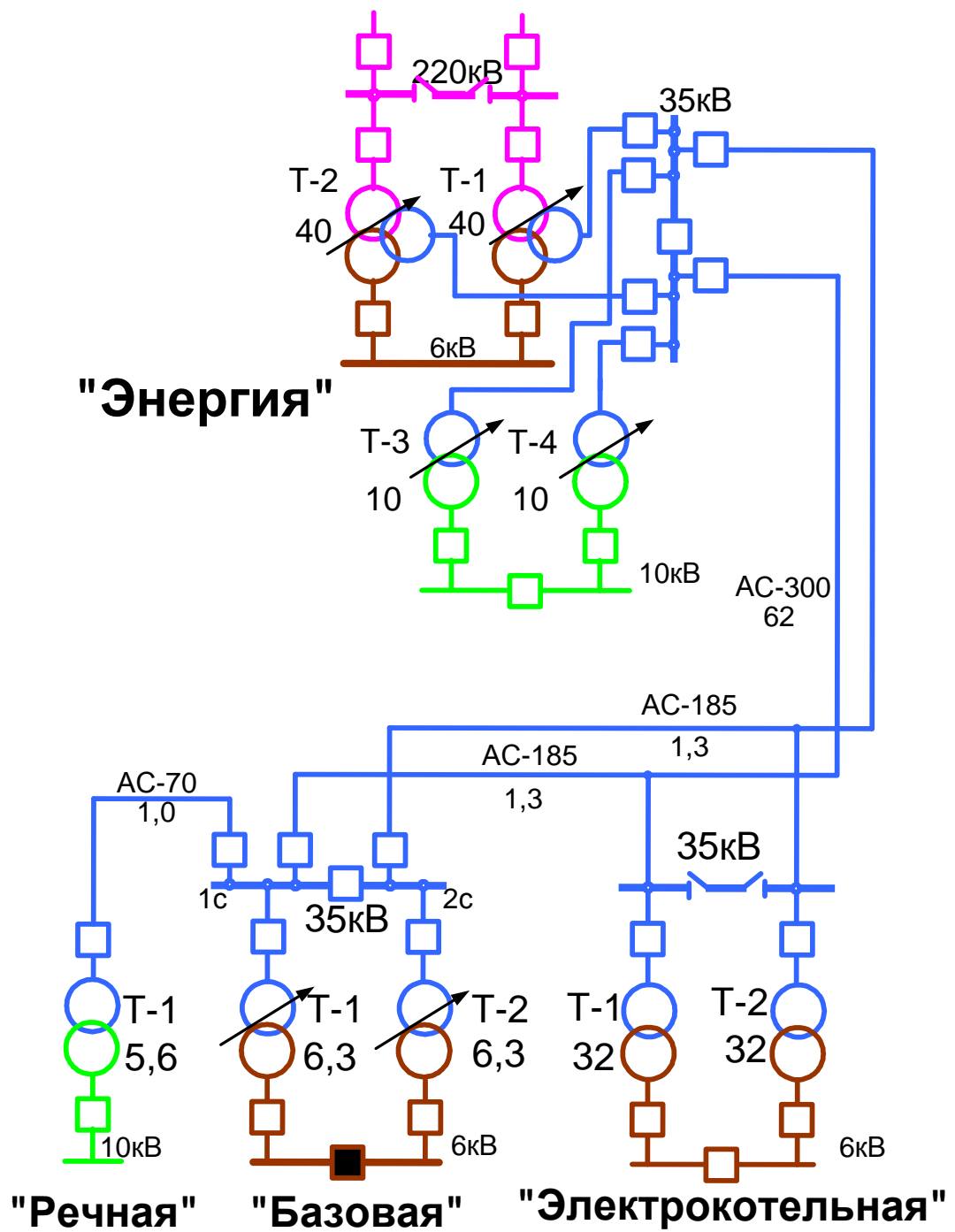


Рисунок П 2.4 - Вариант № 4.

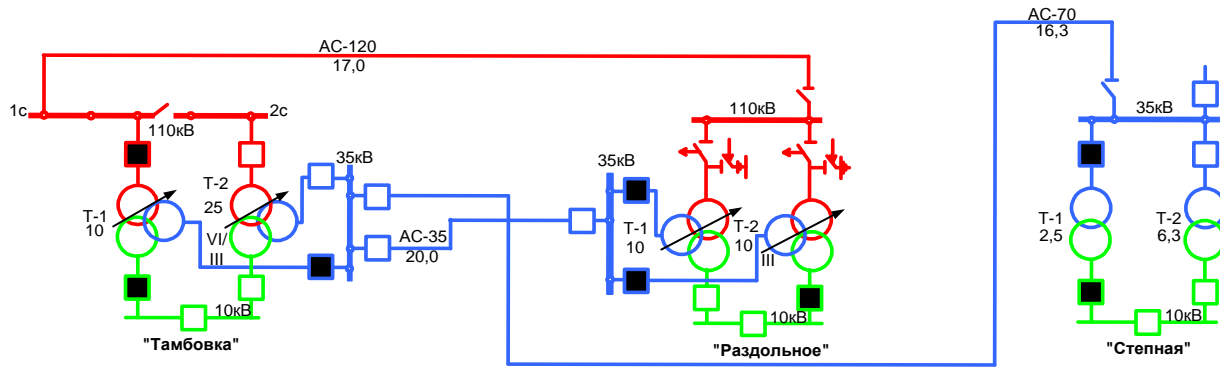


Рисунок П 2.5 - Вариант № 5.

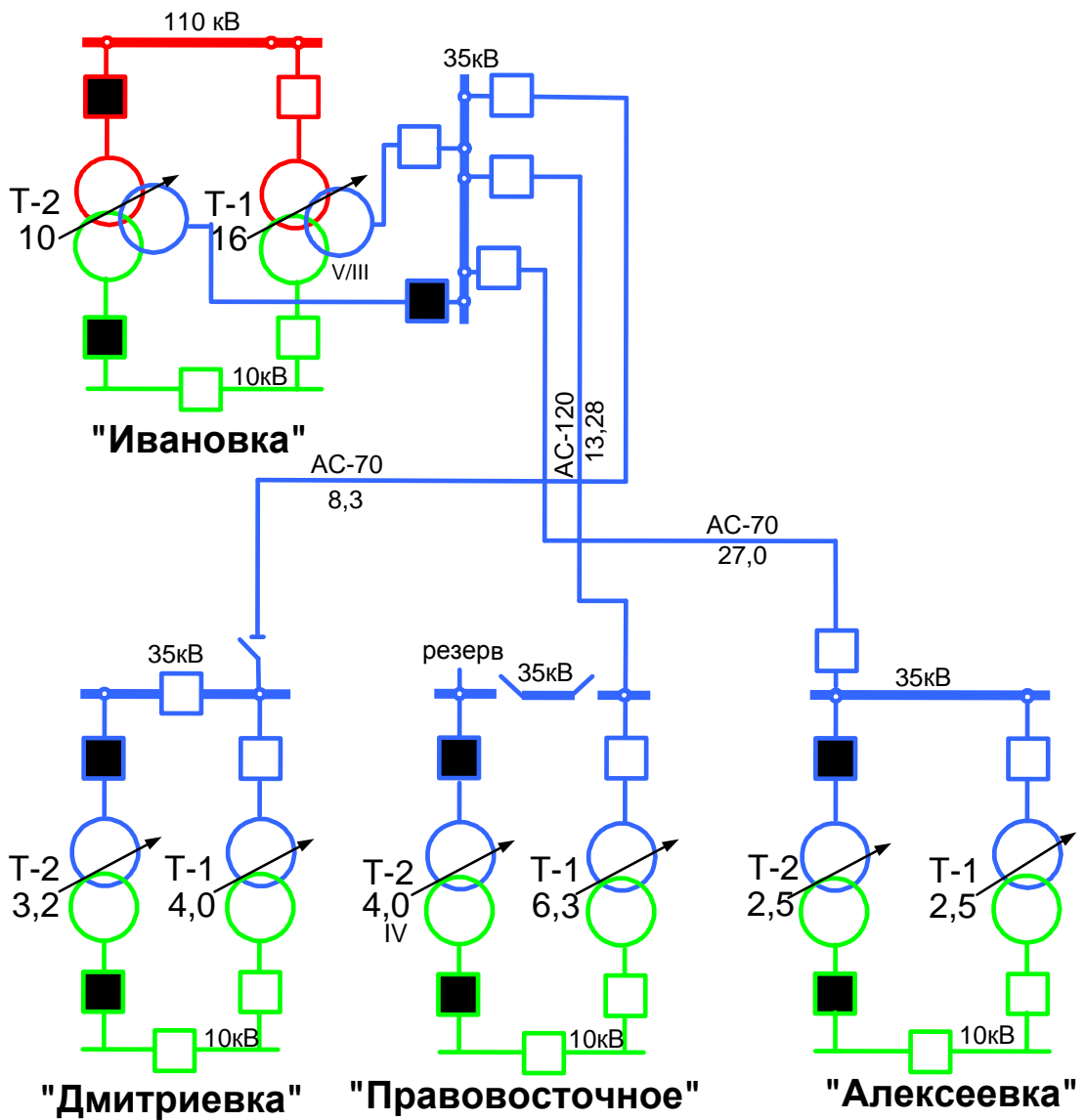


Рисунок П 2.6 - Вариант № 6.

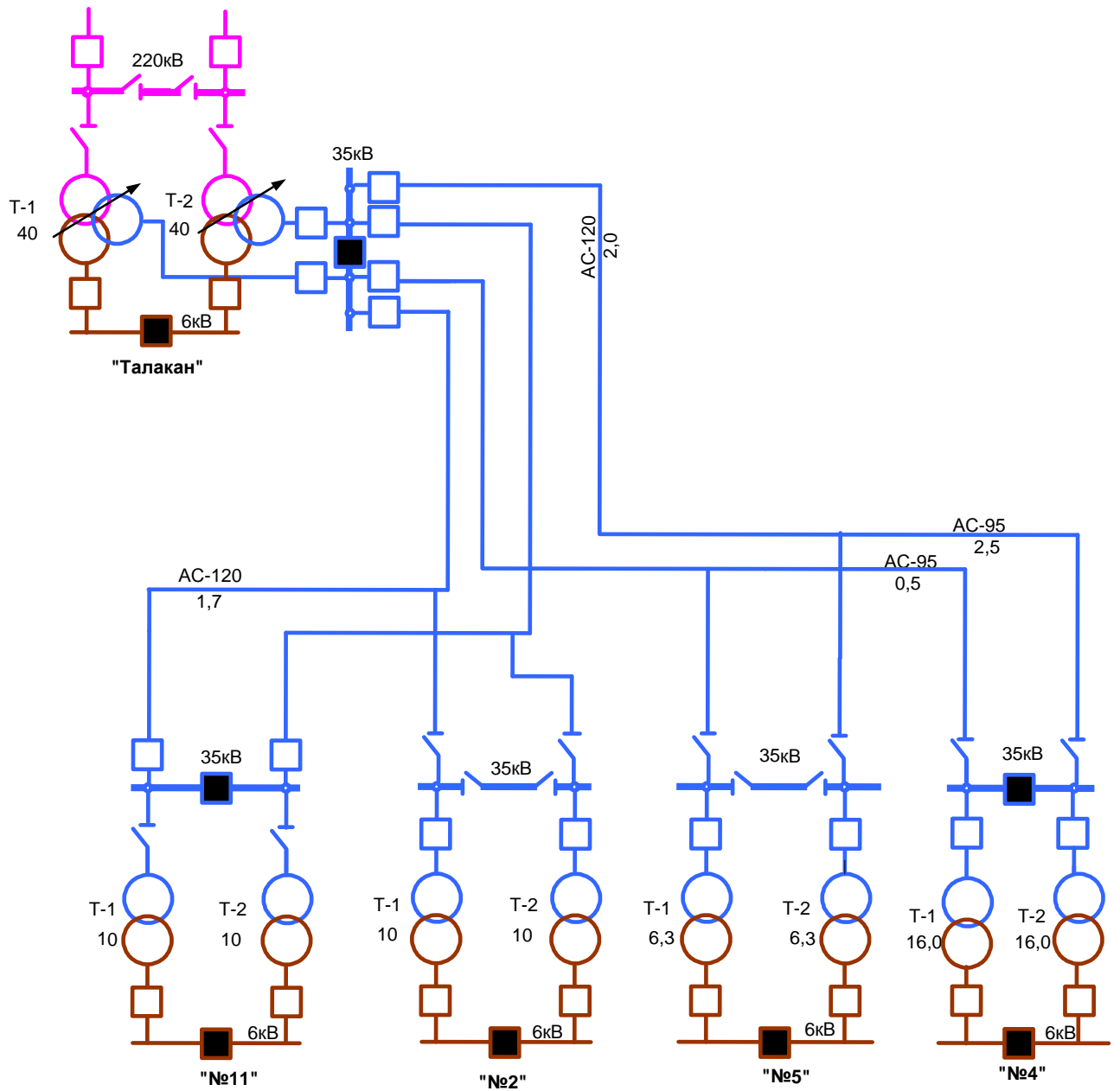


Рисунок П 2.7 - Вариант № 7.

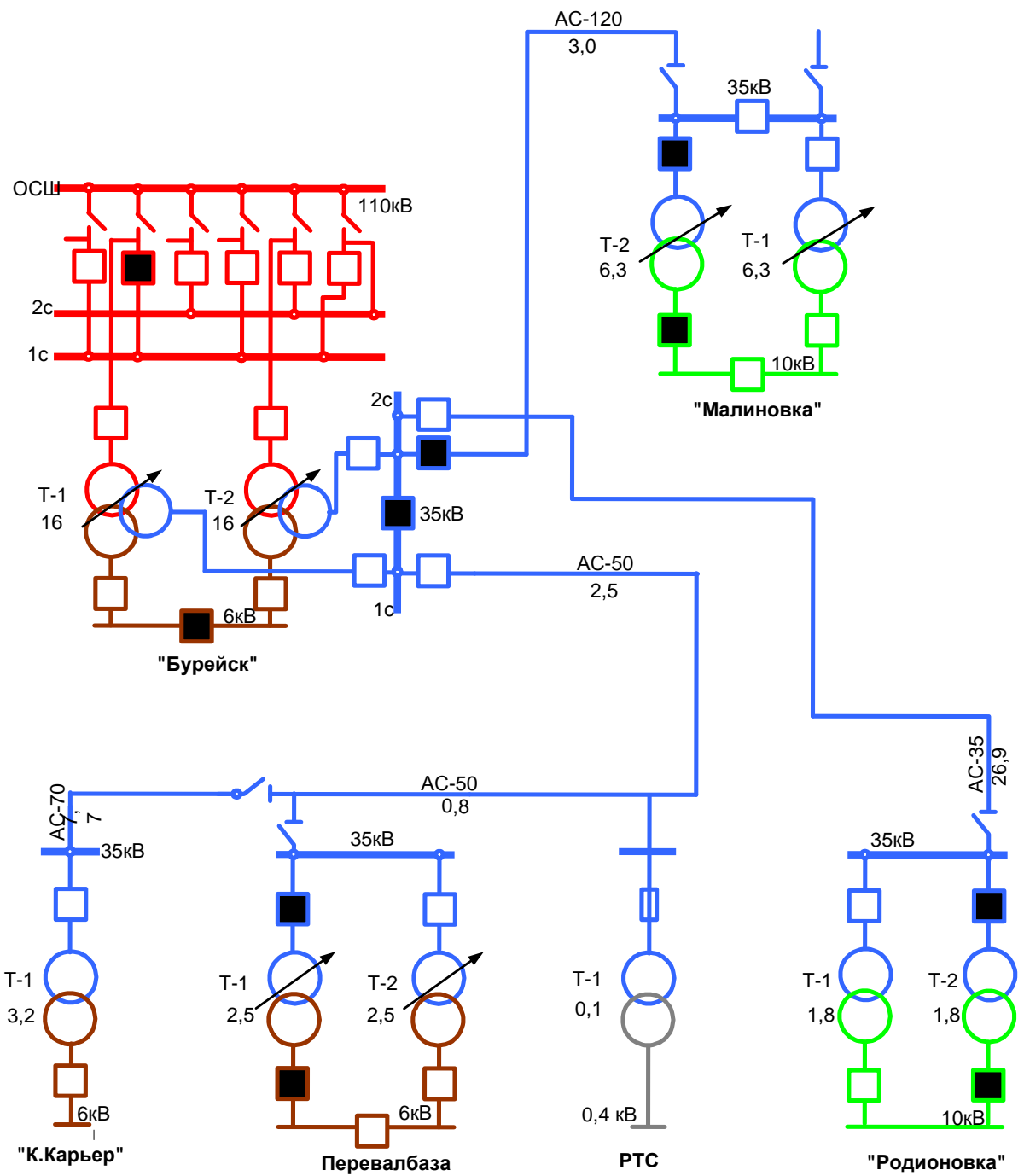


Рисунок П 2.8 - Вариант № 8.

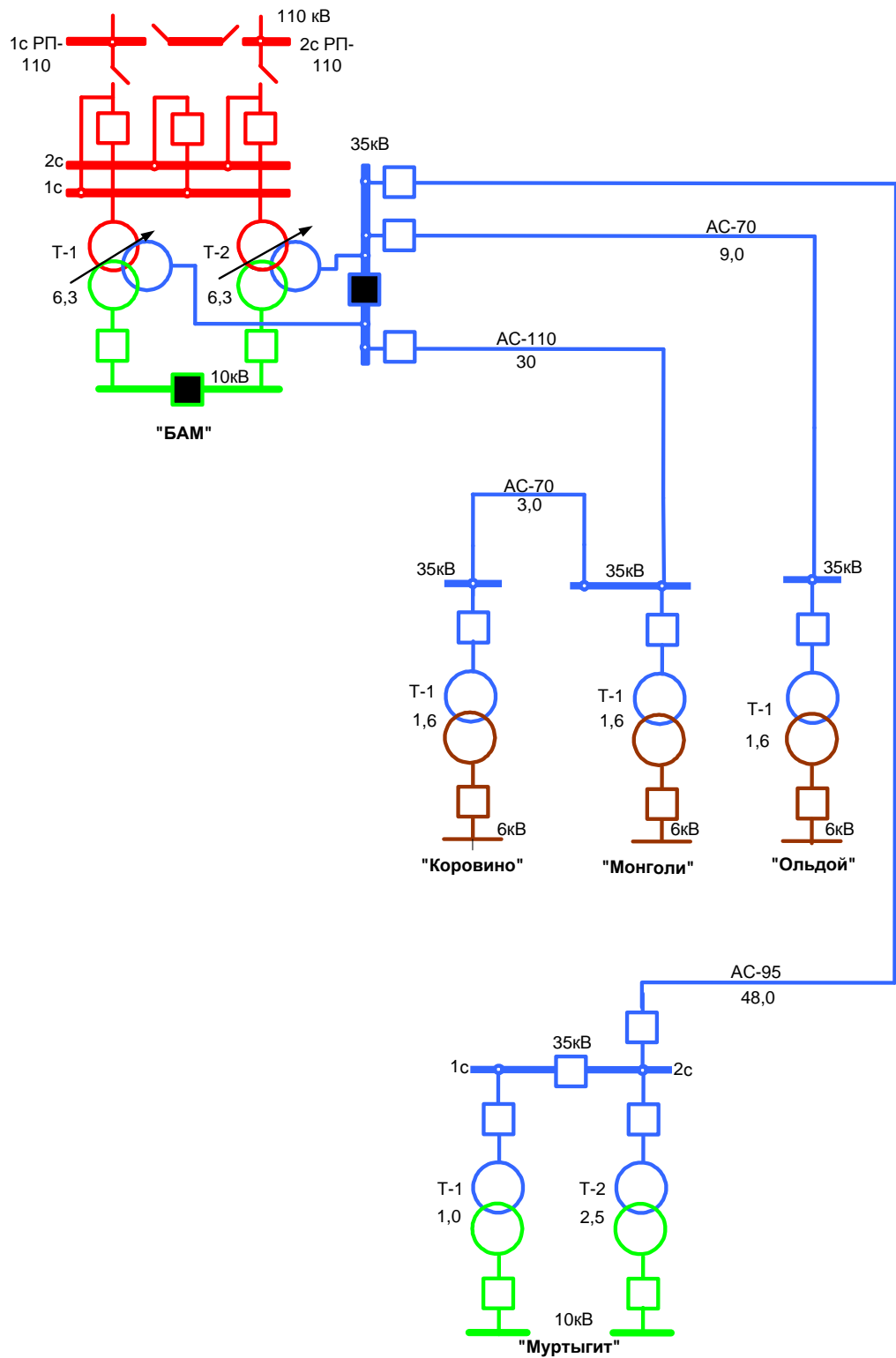


Рисунок П 2.9 - Вариант № 9.

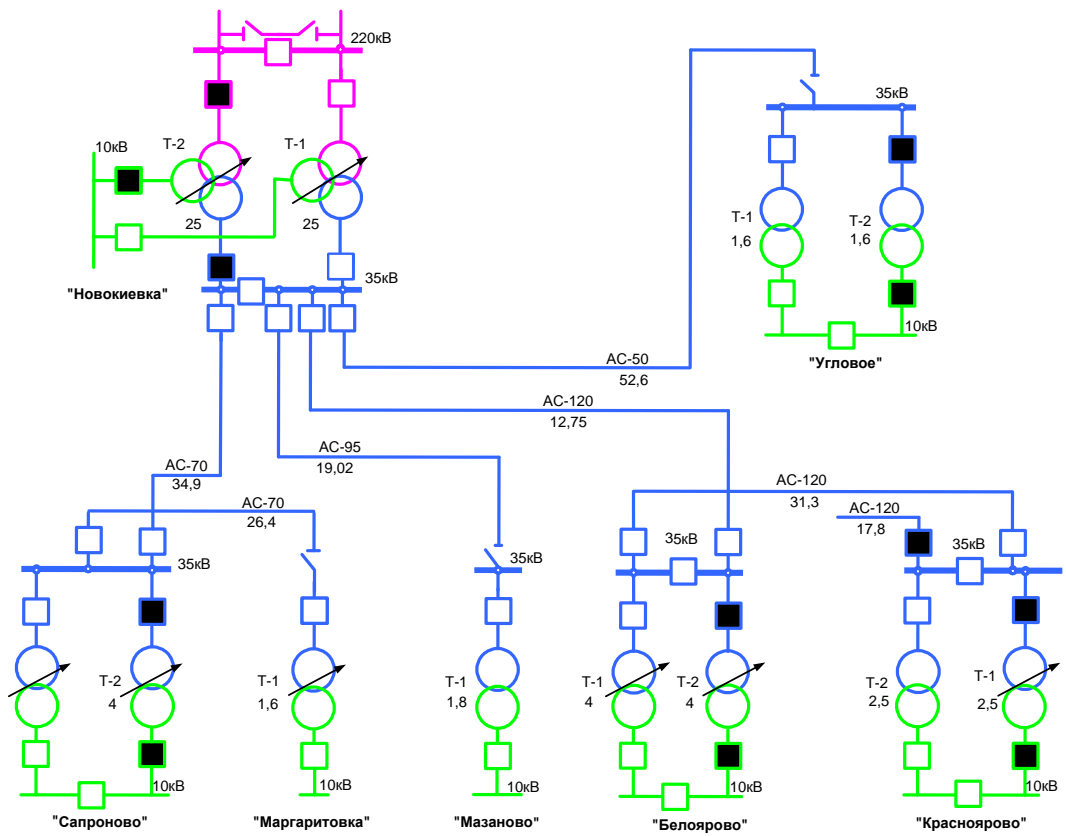


Рисунок П 2.10 - Вариант № 10.

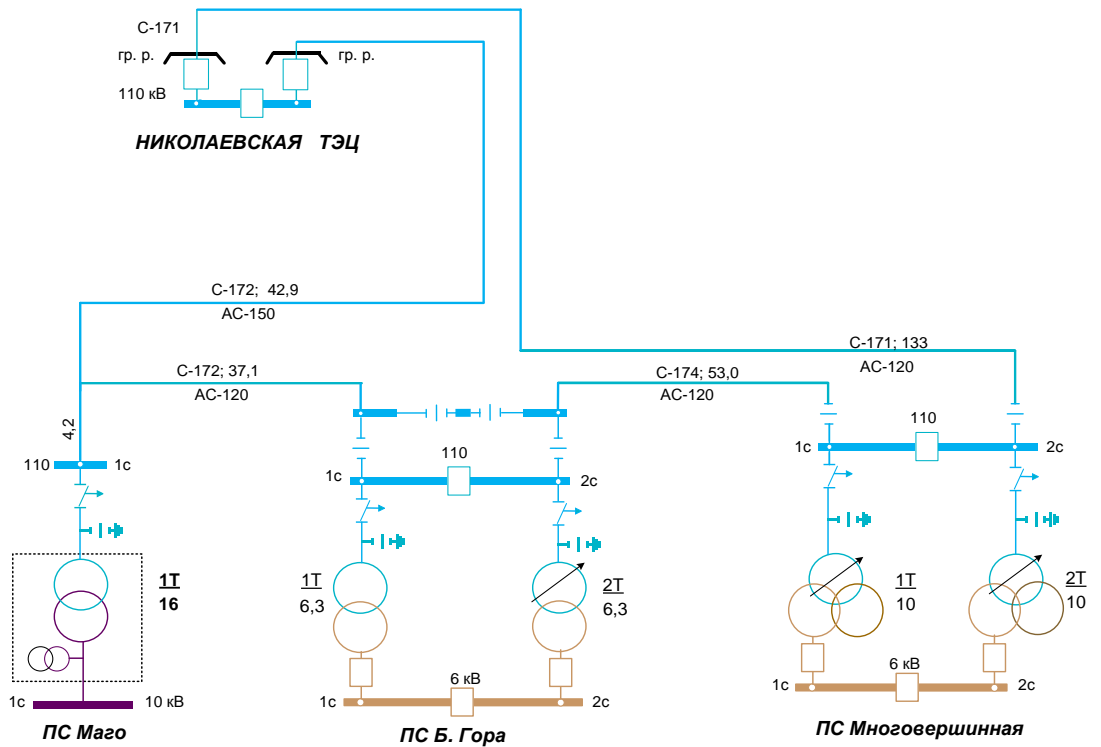


Рисунок П 2.11 - Вариант № 11.

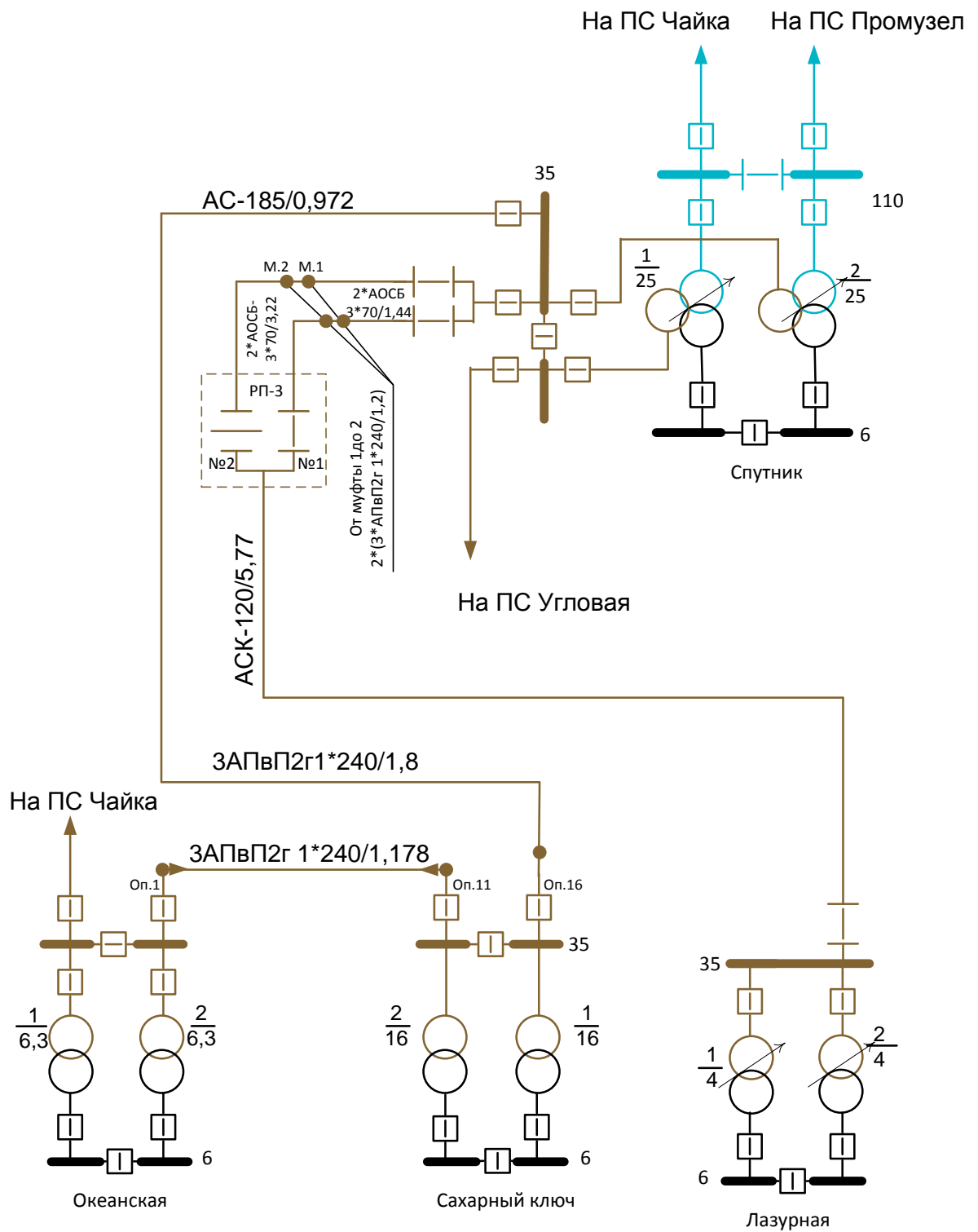


Рисунок П 2.12 - Вариант № 12.

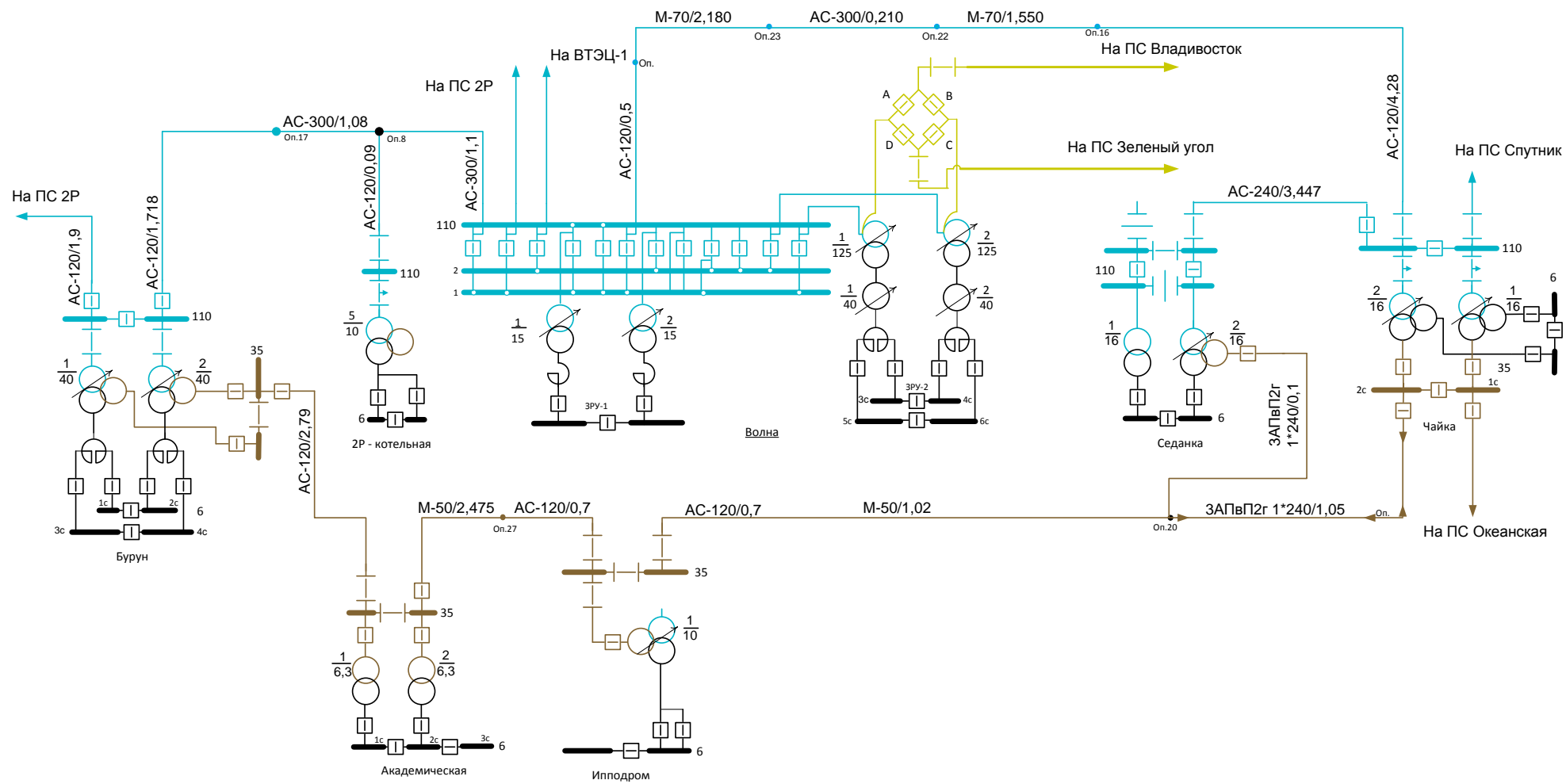


Рисунок П 2.13 - Вариант № 13.

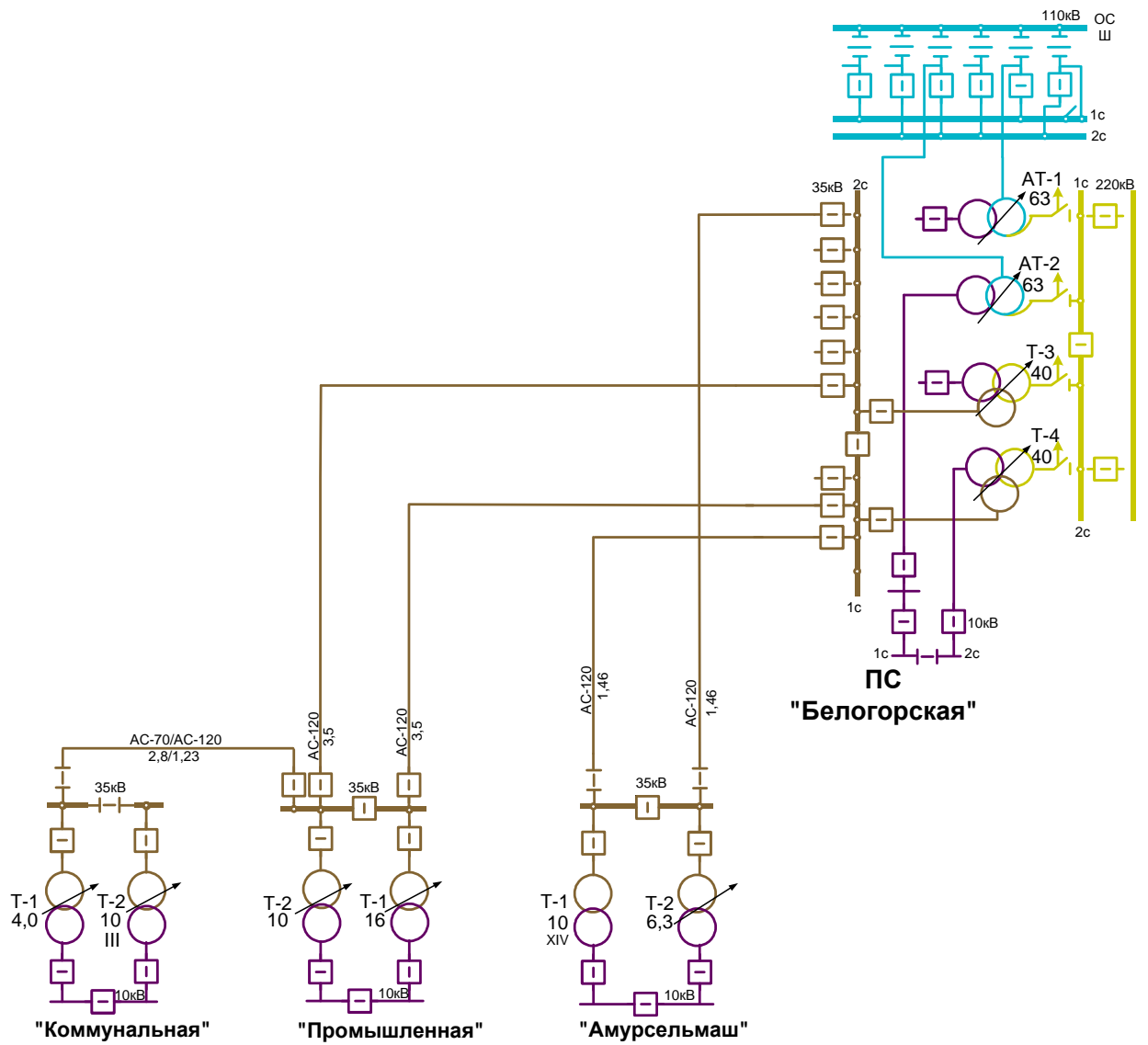


Рисунок П 2.15 - Вариант № 15.

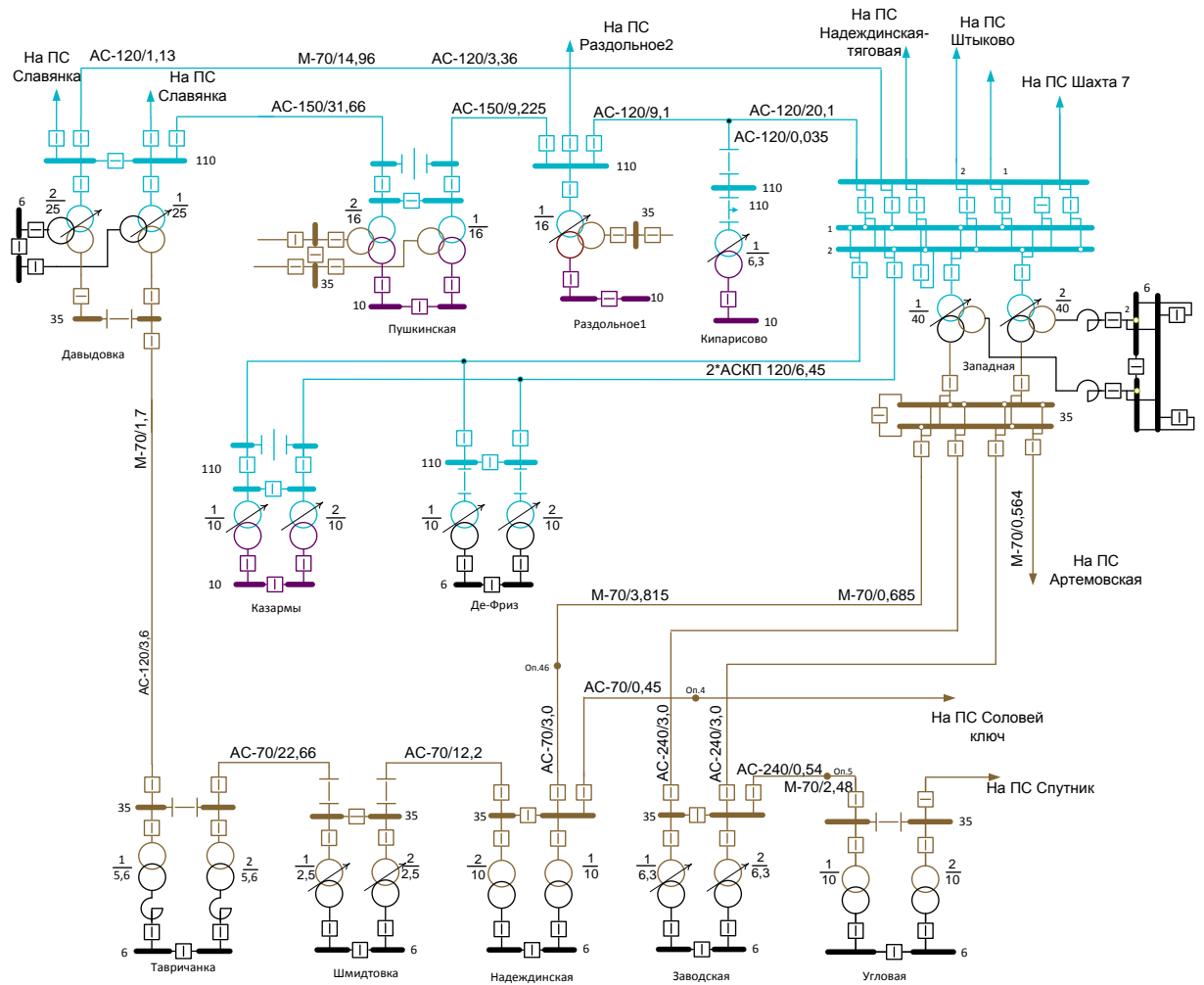


Рисунок П 2.16 - Вариант № 16.

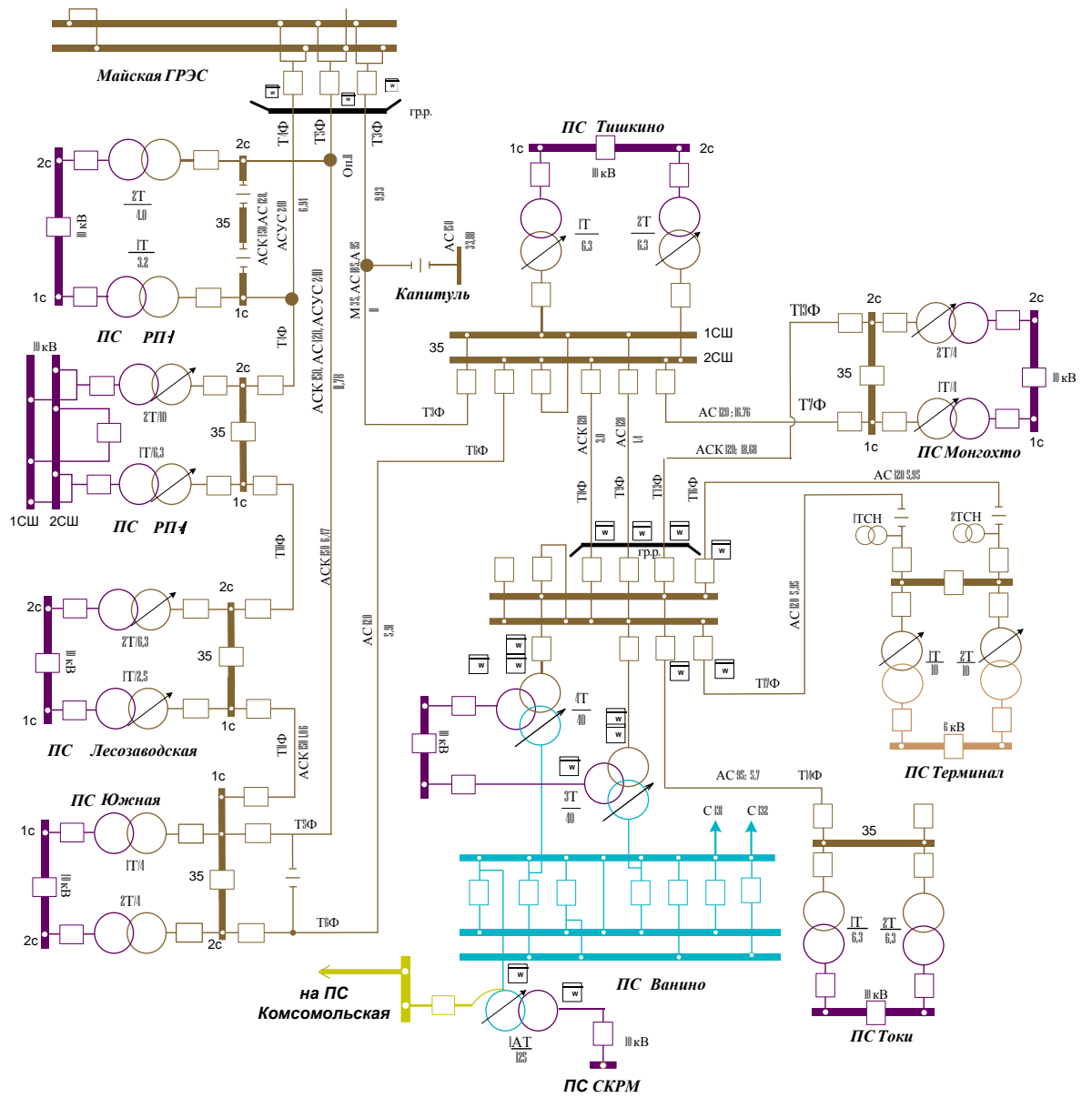


Рисунок П 2.17 - Вариант № 17.

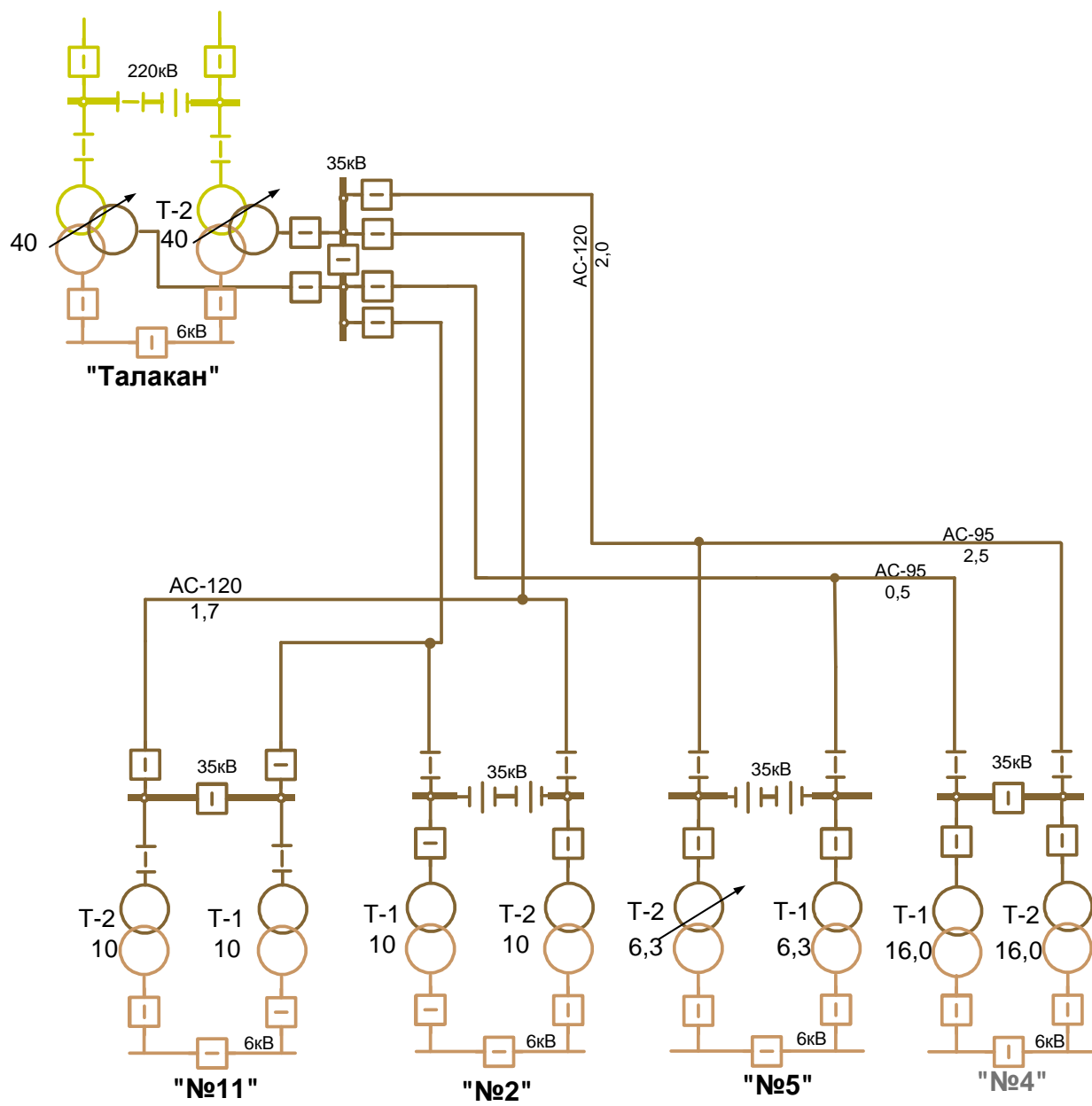


Рисунок П 2.18 - Вариант № 18.

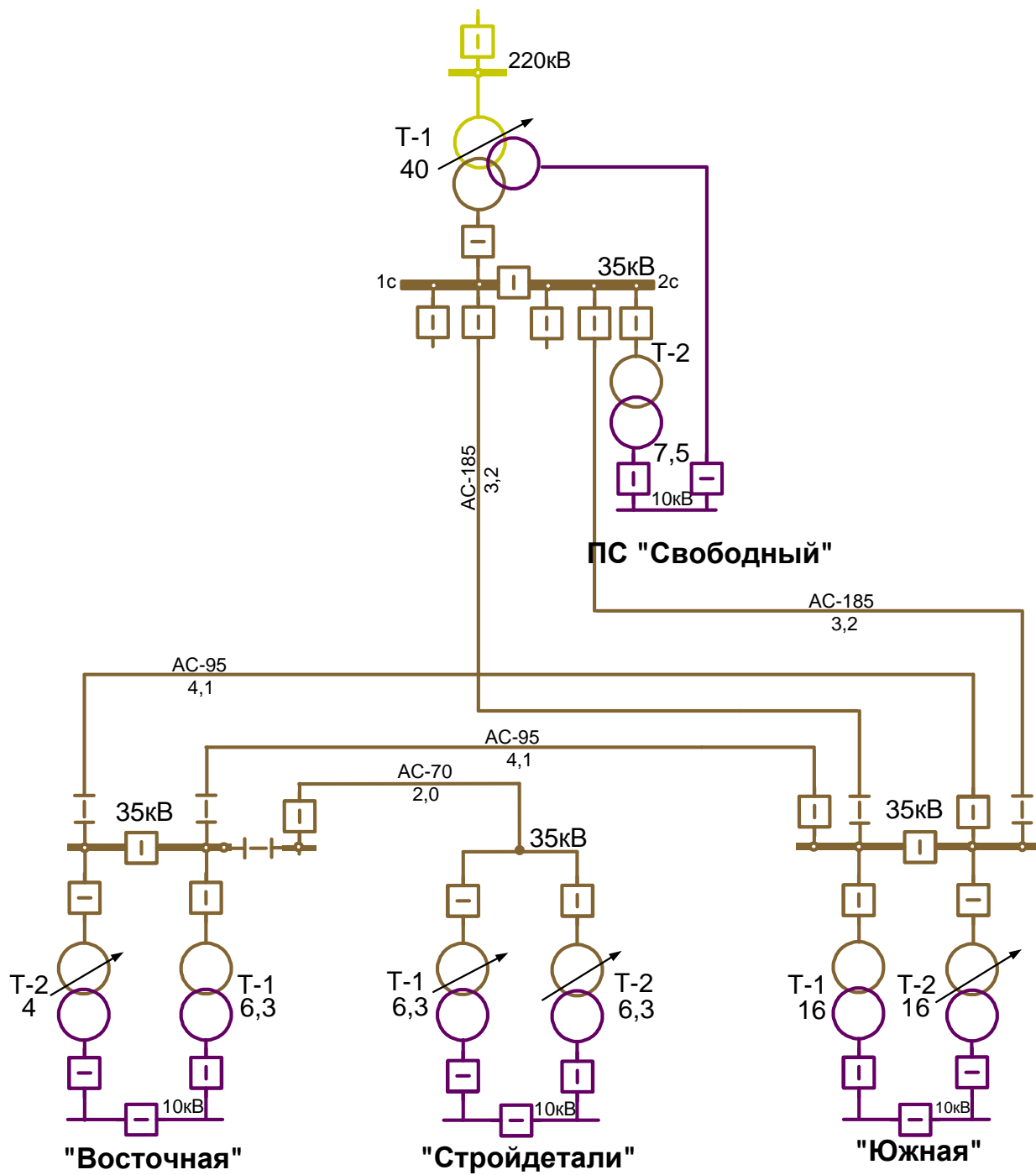


Рисунок П 2.19 - Вариант № 19.

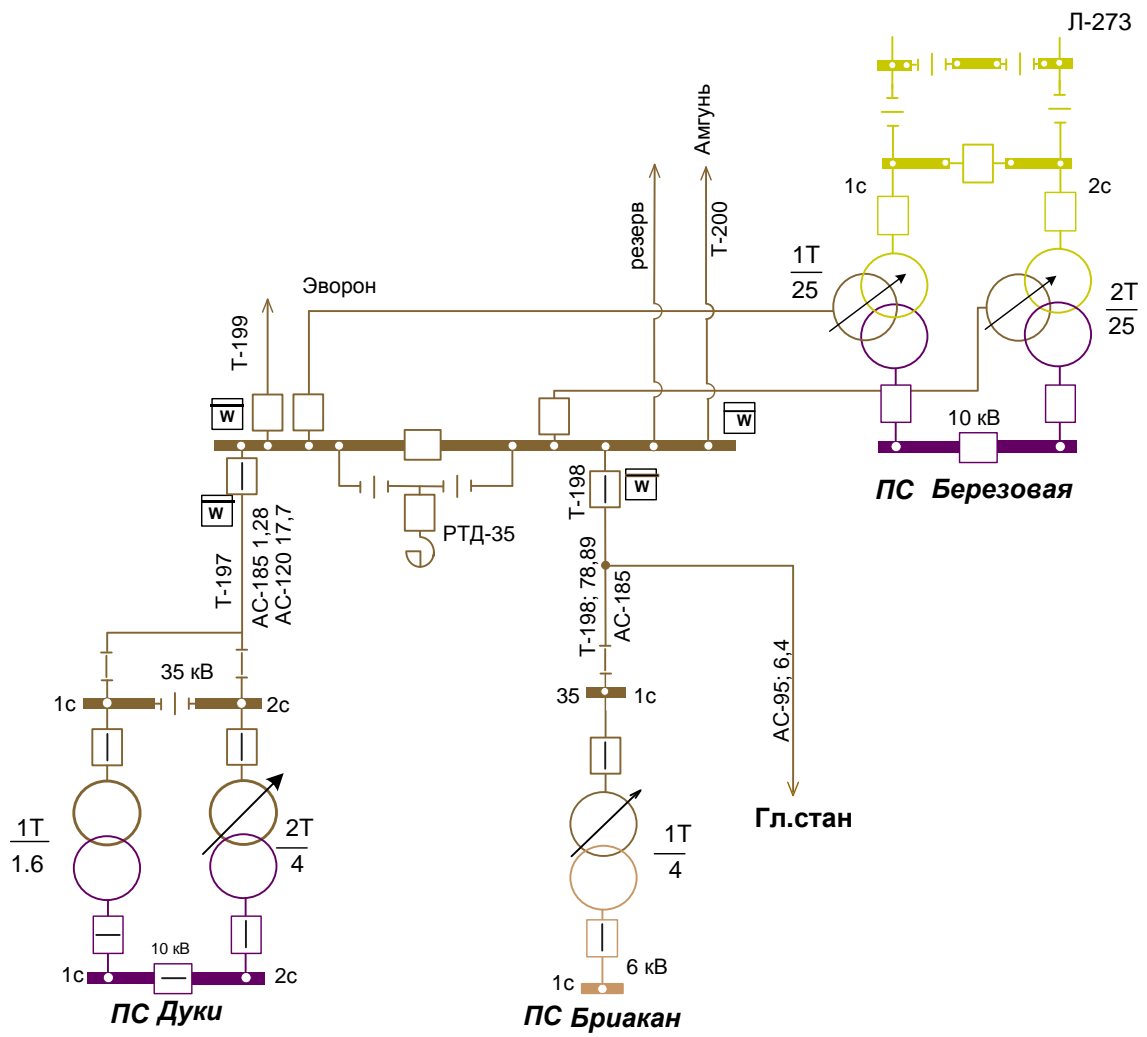


Рисунок П 2.21 - Вариант № 21.

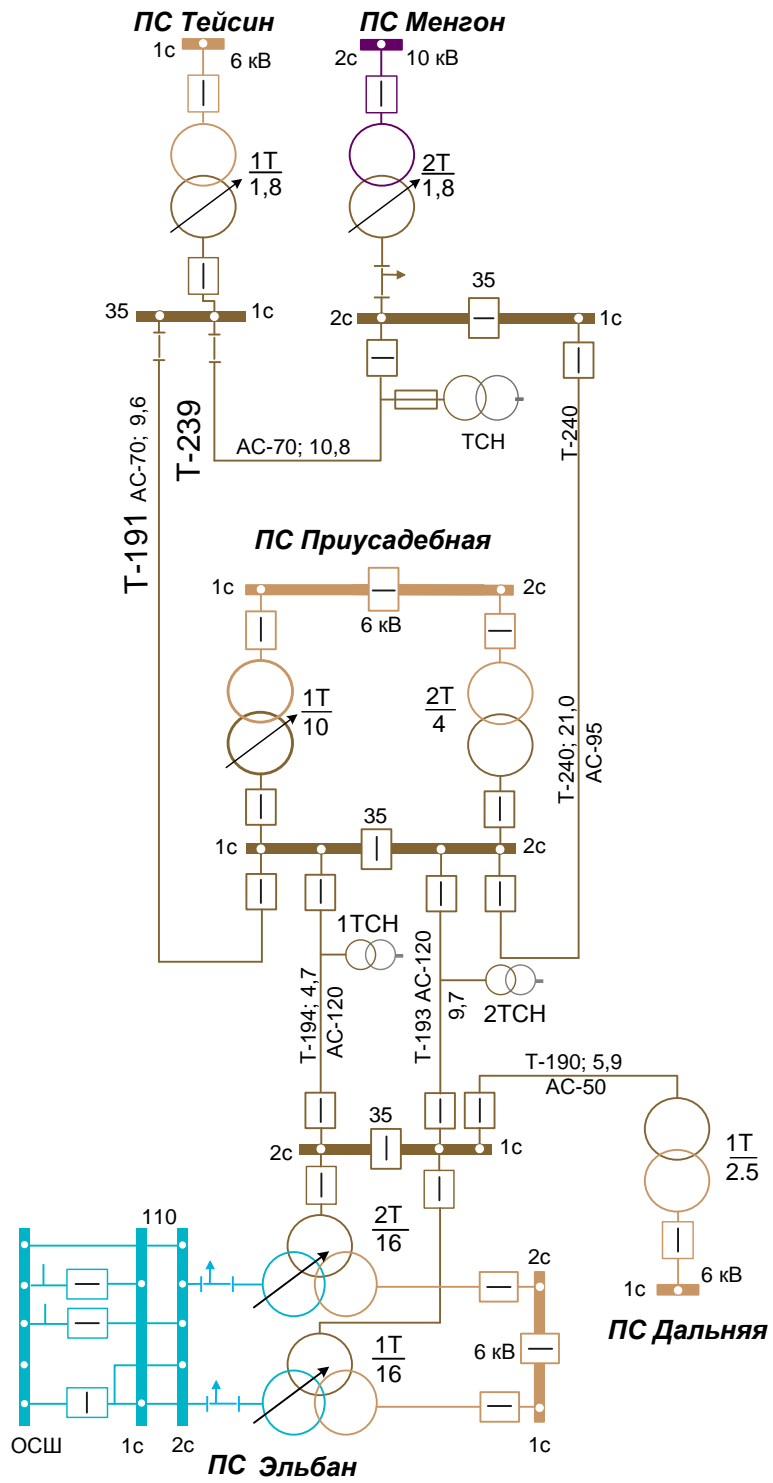


Рисунок П 2.22 - Вариант № 22.

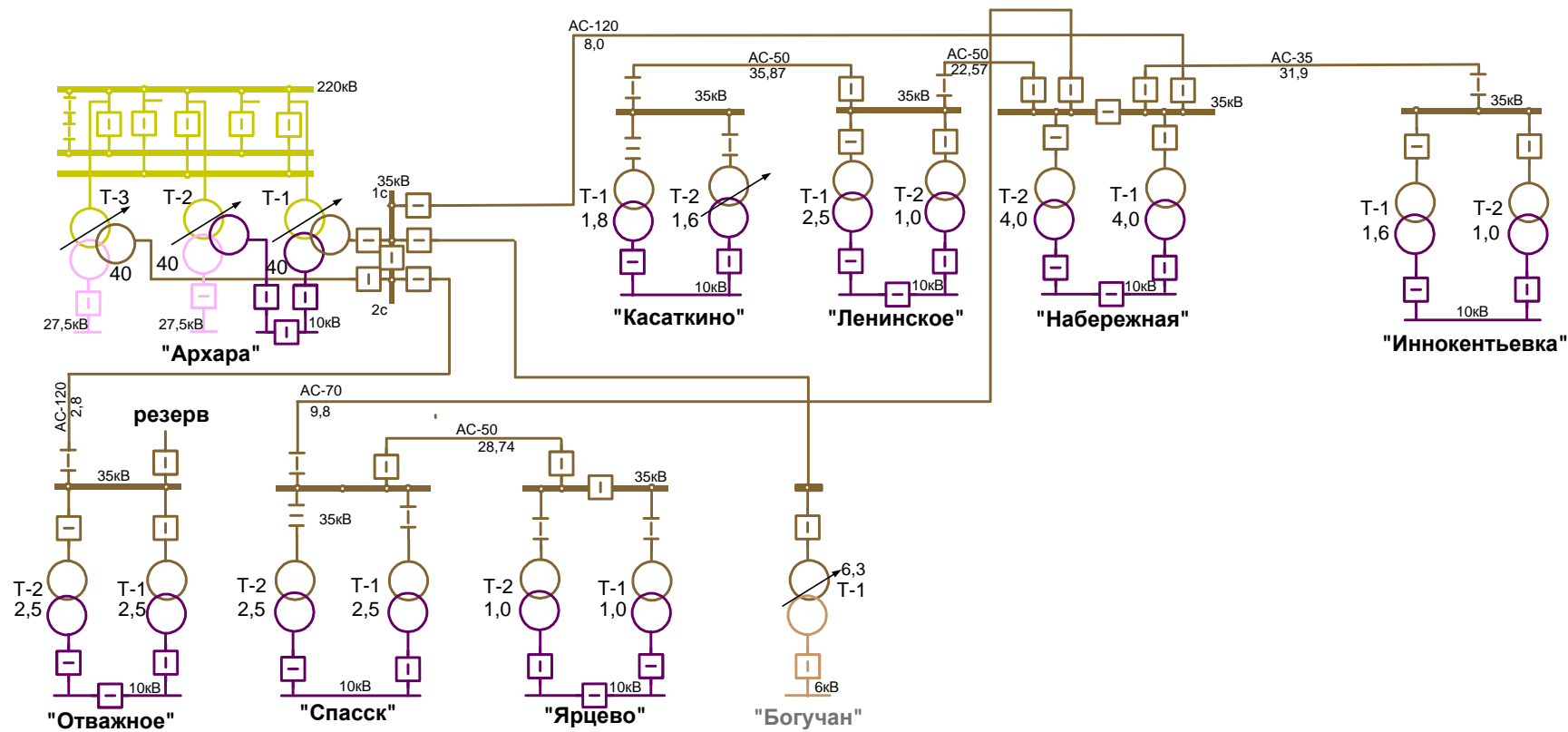


Рисунок П 2.23 - Вариант № 23.

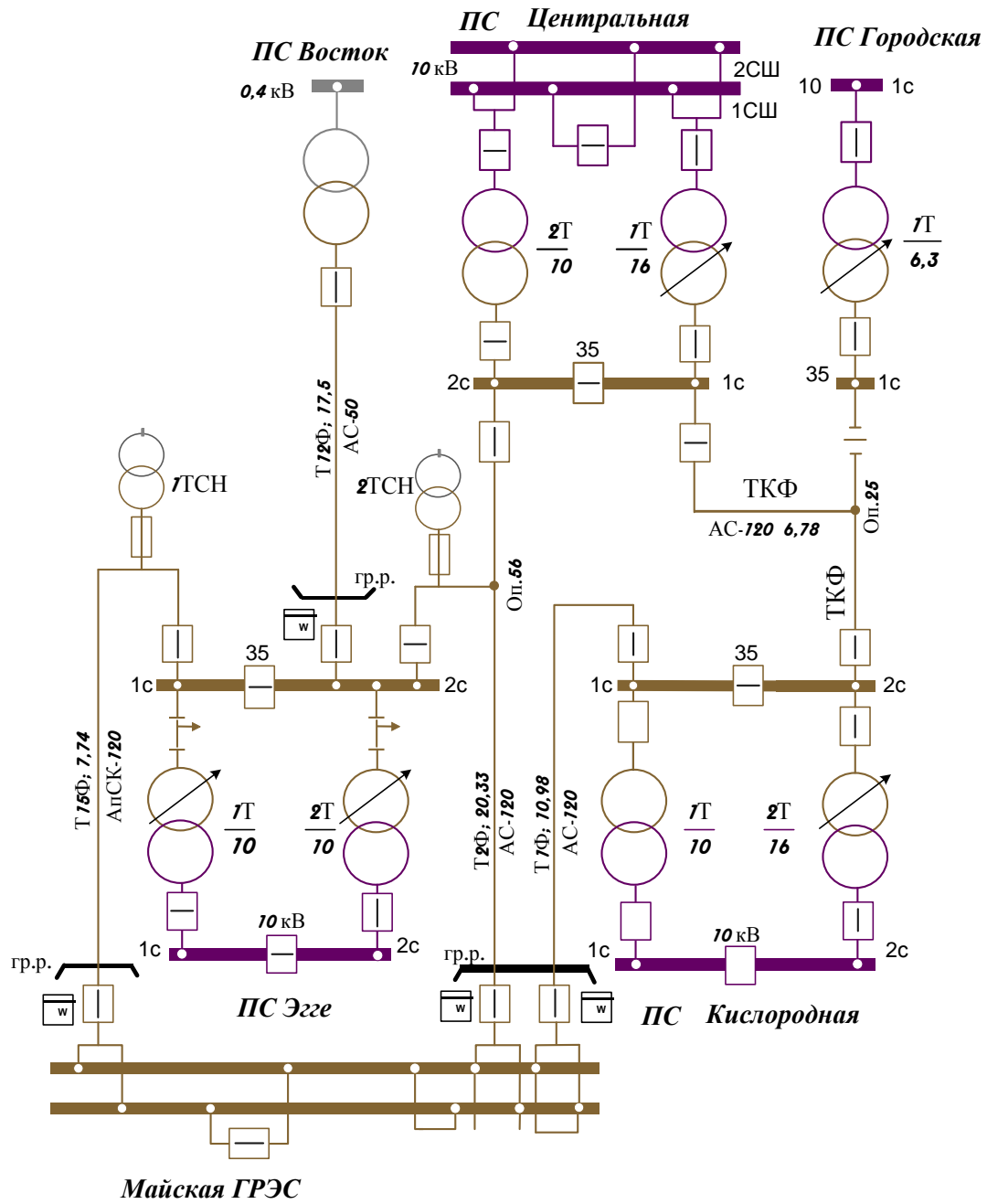


Рисунок П 2.24 - Вариант № 24.

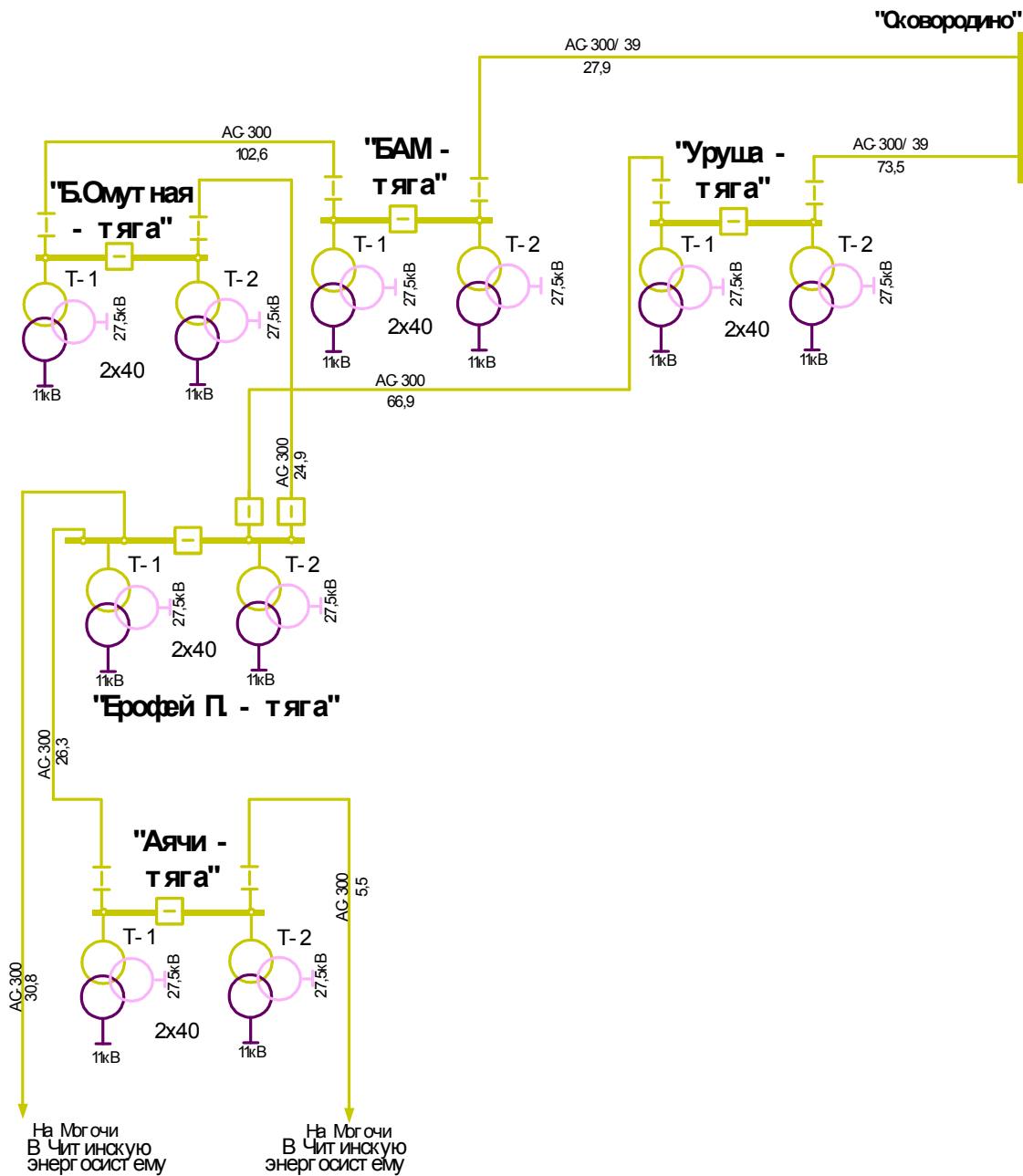


Рисунок П 2.25 - Вариант № 25.

Учебное издание

Казакул Алексей Александрович,

Доцент кафедры энергетики ФГБОУ ВО «АмГУ»

СПЕЦИАЛЬНЫЙ КУРС ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Методические указания по решению практических задач

Издательство АмГУ. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 7,32