

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Амурский государственный университет»

А.А. Казакул

# ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРОГРАММНО- ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

*Методические указания по выполнению лабораторных работ*



Благовещенск  
Издательство АмГУ  
2013

ББК 31.2я73  
П81

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

***Разработаны в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера АО «Гидроэлектромонтаж».***

*Рецензенты:*

*Доцент кафедры АППиЭ, канд. техн. наук – Д.А. Теличенко.*

*Директор пуско-наладочного управления АО «Гидроэлектромонтаж» – Н.И. Морозов.*

*Казакул А.А.*

П81 Промышленные программно-вычислительные комплексы в электроэнергетике. Методические указания по выполнению лабораторных работ/ сост. Казакул А.А. - Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2013. – 91 с.

Методическое пособие по выполнению лабораторных работ предназначено для подготовки магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника». В пособие входит пять лабораторных работ, выполнение которых направлено на развитие у студентов практических навыков по выполнению расчётов в RastrWin3 и по проектированию подстанций в Model Studio CS.

***В авторской редакции.***

ББК 31.2я73

©Амурский государственный университет, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Список сокращений	5
Лабораторная работа № 1. Моделирование элементов ЭЭС в ПВК RastrWin	6
Лабораторная работа № 2. Расчёт установившегося режима электрической сети нескольких классов номинального напряжения в ПВК RastrWin.	15
Лабораторная работа № 3. CIM модели ПВК RastrWin	21
Лабораторная работа № 4. Расчёт токов короткого замыкания в ПВК RastrWin	30
Лабораторная работа № 5. 3D моделирование подстанций в Model Studio CS	46
Заключение	52
Список литературы	53
Приложение 1. Однолинейные схемы электрических сетей для расчётов электрических режимов	55
Приложение 2 Вспомогательные материалы для выполнения лабораторной работы по созданию 3D моделей ОРУ подстанций.	77

## ВВЕДЕНИЕ

Надёжное и качественное электроснабжение потребителей зависит от качества проектирования и эксплуатации электроэнергетического оборудования. Современные условия дефицита времени требуют от специалистов электроэнергетической отрасли принятия оперативных, технически грамотных и обоснованных решений. Таковые могут быть приняты лишь грамотными и опытными специалистами на основании инженерных изысканий и соответствующих расчётов.

В частности, выбор параметров электротехнического и электроэнергетического оборудования основан на результатах расчёта установившихся электрических режимов и токов короткого замыкания. Оперативный расчёт данных параметров возможен только при наличии персонала, способного использовать современное прикладное программное обеспечение.

Обучение прикладных магистров для нужд современного производства включает в себя изучение современных наиболее распространённых прикладных программ, которые повышают производительность труда и качество получаемых результатов.

Настоящее пособие предполагает обучение студентов практическим навыкам работы в ПВК RastrWin3, RastrRZ для расчётов установившихся режимов и токов короткого замыкания, а так же в Model Studio CS ОРУ для проектирования ОРУ подстанций в формате 3D. Последний ПВК в автоматическом режиме проводит необходимые механические расчёты шин и выявляет несоответствие габаритов между элементами электроустановок.

Самостоятельное выполнение приведённых лабораторных работ в комплексе с материалом практических занятий позволяет сформировать указанные компетенции.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БСК – батарея статических конденсаторов;  
ВЛ – воздушная линия;  
ВН – высшее напряжение подстанции;  
ЕНЭС – единая национальная электрическая сеть;  
КРМ – компенсация реактивной мощности;  
КЛ – кабельная линия;  
ЛЭП – линия электропередач;  
НН – низшее напряжение подстанции;  
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.

## Лабораторная № 1

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЭС В ПВК RASTRWIN.

**Цель работы:** изучение способов моделирования элементов электроэнергетической системы в ПВК RastrWin для расчётов электрических режимов.

#### ЗАДАНИЕ

В соответствии с вариантами, приведёнными в таблице 1.1:

1. Рассчитать параметры схемы замещения для заданных элементов ЭЭС (ВЛ, КЛ, трансформаторов) участков сети и трансформаторов. Напряжения СН и НН для трансформаторов выбрать самостоятельно.
2. Пронумеровать узлы каждого элемента для его задания в ПВК RastrWin.
3. Выполнить моделирование каждого элемента электрической сети для ПВК RastrWin.
4. Смоделированные элементы изобразить на графической схеме в ПВК RastrWin.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

При рассмотрении симметричных установившихся режимов системы трехфазного переменного тока общепринятым является допущение о том, что она представляет собой линейную симметричную электрическую цепь. При этом схема замещения составляется на одну фазу с нейтралью и ее параметры в общем случае являются комплексными величинами. В то же время исходные данные для определения указанных параметров существенно различаются для элементов разного типа [1, 16].

Для выполнения расчётов установившихся электрических режимов необходимо знание моделей, с помощью которых можно представить в расчётной программе основные элементы ЭЭС.

Схема замещения электрической сети составляется путём объединения схем замещения элементов сети. Основными элементами схем замещения являются воздушные и кабельные ЛЭП и различного типа трансформаторы.

В ПВК RastrWin для задания параметров линий электропередачи используется (ЛЭП) П-образная схема замещения, а для трансформаторов — Г-образная.

Параметры схемы замещения линии электропередачи в общем случае определяются ее длиной и удельными (на 1 км) значениями активного и индуктивного сопротивлений, активной и емкостной проводимостей. Значения удельных параметров ВЛ зависят от таких факторов, как конструктивное выполнение, число цепей, число проводов в фазе, взаимное расположение фаз и цепей, материал токоведущих элементов.

Таблица 1.1 – Перечень исходных данных для выполнения лабораторной работы

№ вар-та	Тип двухобмоточного трансформатора	Тип трёхобмоточного трансформатора (автотрансформатора)	Марка и протяжённость ВЛ	Уном ВЛ, кВ	Марка и протяжённость КЛ	Уном КЛ, кВ
1	ТМН (ТМ)- 6300/35	АОДЦТ- 417000/750 /500-У1	АС-120/27 - 33 км	35	АОСБЛНУ 3х120 - 10 км	35
2	ТМН- 10000/35	АОДЦТН-167000/500 /330-У1	АС-150/19 - 40 км	35	АОСБЛУ 3х150 - 20 км	35
3	ТДНС- 16000/35	АОДЦТН-167000/500 /220-У1	АС-150/24 - 20 км	35	ОАБ2ЛУ 3х150 - 5 км	35
4	ТРДНС- 63000/35	АТДЦТН-250000/500 /110-У1	АС-150/34 - 15 км	35	ОАБЛУ 3х120 - 25 км	35
5	ТДН-16000/150	АОДЦТН-267000/500 /220-У1	(2 × АС 700/86) - 400 км	500	АПВБВ 3х240 - 7 км	20
6	ТРДН-32000/150	АТДЦТН -125000/330 /110-У1	(3 × АС 300/39) - 550 км	500	АПВБВ 3х120 - 17 км	20
7	ТРДН-63000/150	АОДЦТН- 133000/330 /220-У1	(4 × АС 185/29) - 600 км	500	АПВБВ 3х95 - 4,5 км	10
8	ТЦ-250000/150	АТДЦТН-200000/330 /110-У1	(3 × АС 300/39) - 300 км	500	ПвВ 3х95 - 10 км	10
9	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-125000/220 /110-У1	(3 × АС 300/39) -250 км	500	ПвВ 3х95 - 3,5 км	10
10	ТРДЦН-160000/220	АТДЦТН-200000/220 /110-У1	АС 300/67 - 80 км	220	АПвПу2г 800(225) - 15 км	220
11	ТДЦ-250000/500,	АТДЦТН-250000/220 /110-У1	АС 300/67 - 90 км	220	АПвПг 500/120 - 27 км	220
12	ТЦ-1000000/500	АТДЦТН- 63000/220/ 110-У1	АС 240/32 - 50 км	220	ПвПг 400/120 - 40 км	220
13	ТДН-16000/110	ТДТН-10000 /110-У1	АС 185/43 - 50 км	110	ПвПг 1000/185 - 15 км	110
14	ТДЦ- 125000/110	ТДТН-16000 /110-У1	АС 240/39 - 100 км	110	АПвПу2г 500/120 - 30 км	110
15	ТДЦ- 80000/110	ТДТН-25000 /110-У1	АС 300/67 - 60 км	110	ПвПг 630/150 - 10 км	110
16	ТДНЖ-25000/110	ТДТНЖ-25000/110-У1	АС 240/39 - 20 км	110	ПвП2г 400/120 - 17 км	110
17	ТРДН- 40000/110	ТДТН-25000 /110-У1	(2 × АС 240/32) - 350 км	330	АПвП 3х150 - 1,5 км	10
18	ТРДН 40000/220	ТДТН-40000 /110-У1	(3 × АС 120/19) - 500 км	330	АПвПу 3х185 - 3,5 км	10
19	ТРДЦН-63000/220	ТДТН-63000 /110-У1	(3 × АС 150/24) - 450 км	330	АПвПу 3х150 - 2,5 км	10
20	ТДЦ-200000/220	ТДЦТН-63000 /110-У1	АС 185/43 - 50 км	220	АПвПу 3х240 - 1,5 км	10
21	ТДЦ- 400000/220	ТДТНМ-63000 /110-У1	АС 240/39 - 60 км	220	АПвПу 3х150 - 4,5 км	6
22	ТЦ- 1000000/220	ТДТН-80000 /110-У1	(4 × АС 400/93) - 600 км	750	АПвПу 3х120 - 3,5 км	6
23	ТРДНС-40000/330	ТДЦТН-80000 /110-У1	(5 × АС 240/32) - 500 км	750	АПвПу 3х240 - 2,8 км	6
24	ТЦ-1000000/330	ТДТНМ-40000/63000 /110-У1	(4 × АС 400/93) - 700 км	750	ПвПг 3х150 - 4,5 км	20
25	ТДЦ- 200000/330	ТДЦТН-100000 /220-У1	(5 × АС 240/32) - 800 км	750	АПвП 3х150 - 5,5 км	20

В настоящем пособии предложены способы моделирования ЛЭП основанные на справочных данных и на данных заводов изготовителей с учётом следующих допущений [16]:

- линии транспонированы, т. е. реактивные параметры отдельных фаз одинаковы;
- для определения реактивных параметров одноцепных ВЛ используются усредненные значения междуфазных расстояний;
- отличие удельных активного и омического сопротивлений пренебрежимо мало, в связи с чем используются значения последнего (для температуры + 20° С), а отличие средне эксплуатационной температуры провода от +20° С не учитывается;
- потерями активной мощности на корону в ВЛ с  $U_{ном} < 220$  кВ можно пренебречь;
- взаимное влияние цепей двухцепных ВЛ не учитывается.

Количество параметров в схеме замещения ЛЭП и КЛ зависит от их номинального напряжения, расположения фаз относительно друг друга и протяжённости.

Для ЛЭП 220 кВ и выше при протяженности более 400 км необходимо учитывать распределённость параметров ЛЭП и рассчитывать их по более сложным выражениям, которые приводятся в [1, 4, 5, 11, 16.].

Схемы замещения ВЛ и КЛ, используемые в ПВК RastrWin для их моделирования и используемые для их расчёта, приведены в таблице 1.2.

В паспортных данных трансформаторов, приводимых в справочной литературе или заводами-изготовителями, обычно приводятся следующие параметры: потери короткого замыкания, потери холостого хода, ток холостого хода, номинальные напряжения обмоток, напряжение короткого замыкания, диапазоны регулирования устройств РПН и ПБВ.

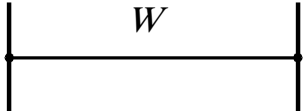
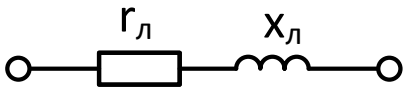
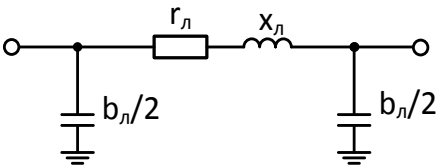
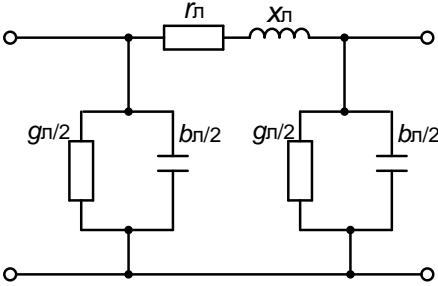
На их основании и выполняются расчёты параметров схем замещения для каждого трансформатора.

Схемы замещения двухобмоточных трансформаторов, в том числе и трансформаторов с расщеплённой обмоткой, трёхобмоточных трансформаторов, автотрансформаторов используемые в ПВК RastrWin, приведены в таблице 1.3.

Причём для трансформаторов активная и реактивная проводимости (G и B) задаются со знаком «+», а проводимости ВЛ и КЛ со знаком «-».



Таблица 1.2– Расчетные схемы и параметры расчетных схем элементов электроэнергетической системы

Наименование элемента	Расчетная схема	Уровень напряжения, протяжённость	Параметры модели (схемы замещения), которые необходимо задавать в ПВК
1	2	3	4
<p>Воздушная линия электропередачи</p> 		6-35 кВ	$r_l = r_0 \cdot l, \text{ Ом};$ $x_l = x_0 \cdot l, \text{ Ом}$
		110-220 кВ до 250 км	$r_l = r_0 \cdot l, \text{ Ом}$ $x_l = x_0 \cdot l, \text{ Ом}$ $b_l = b_0 \cdot l, \text{ мкСм}$
		220-500 кВ до 250 км	$r_l = r_0 \cdot l, \text{ Ом}$ $x_l = x_0 \cdot l, \text{ Ом}$ $b_l = b_0 \cdot l, \text{ мкСм}$ $g_l = g_0 \cdot l, \text{ мкСм}$

Продолжение таблицы 1.2

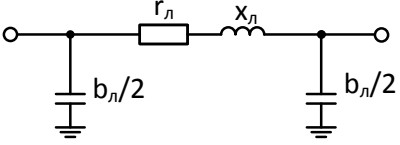
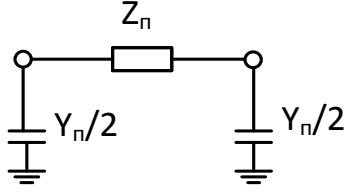
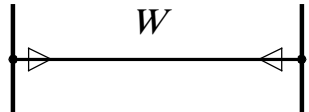
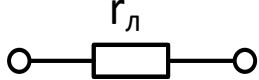
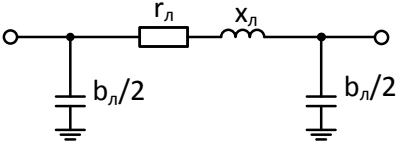
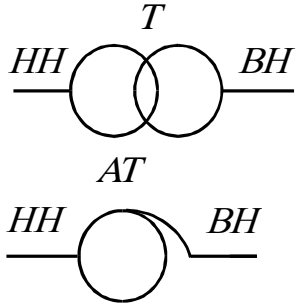
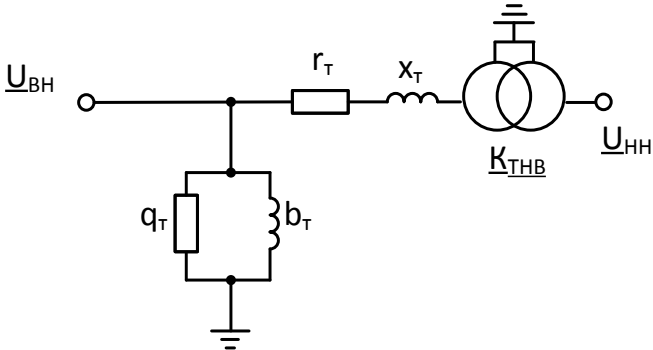
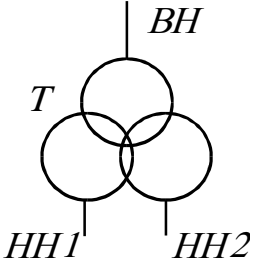
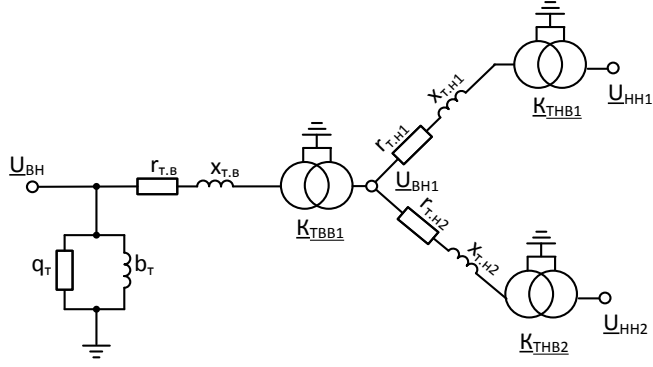
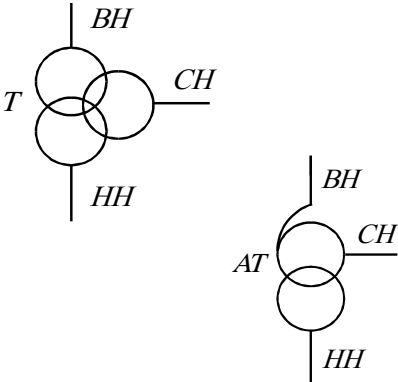
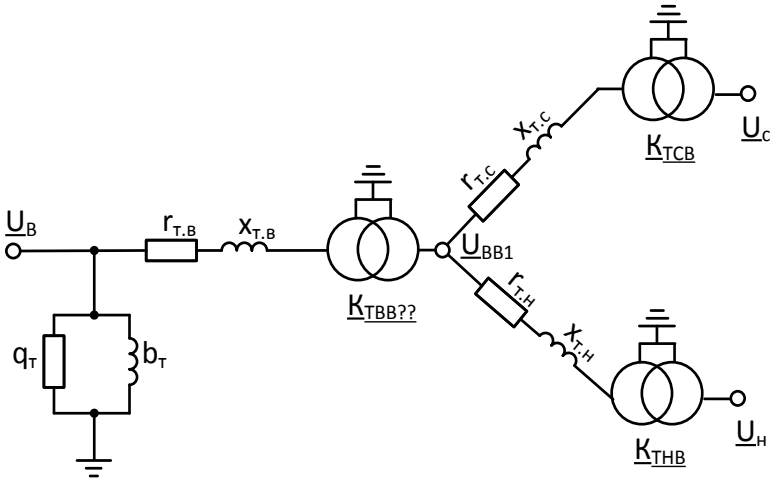
1	2	3	4
		<p>Для ЛЭП протяжённостью 250-600 км</p>	$r_{л} = r_0 \cdot l \cdot k_r, \text{ Ом} \left( k_r = 1 - \frac{L^2}{3} \cdot x_0 \cdot b_0 \right)$ $x_{л} = x_0 \cdot l \cdot k_x, \text{ Ом} \left( k_x = 1 - \frac{L^2}{6} \cdot x_0 \cdot b_0 \right)$ $b_{л} = b_0 \cdot l \cdot k_b, \text{ мкСм} \left( k_b = 1 + \frac{L^2}{12} \cdot x_0 \cdot b_0 \right)$
		<p>Для ВЛЭП протяжённостью 250-1500 км</p>	$Z_{II} = Z_B \frac{r_0}{2 \cdot x_0} (\lambda \cos \lambda + \sin \lambda) + jZ_B \cdot \sin \lambda$ $Y_{II} = \frac{1}{Z_B} \left( \frac{r_0}{2x_0} \cdot \frac{\lambda - \sin \lambda}{1 + \cos \lambda} + j \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} \right)$
<p>Кабельная линия электропередачи</p> 		<p>до 10 кВ включительно</p>	$r_{л} = r_0 \cdot l, \text{ Ом}$
		<p>КЛ 35 кВ и выше</p>	$r_{л} = r_0 \cdot l, \text{ Ом}$ $x_{л} = x_0 \cdot l, \text{ Ом} \text{ или } x_{л} = \omega \cdot L \cdot l, \text{ Ом}$ $b_{л} = b_0 \cdot l, \text{ мкСм} \text{ или } b_{л} = \omega \cdot C \cdot l, \text{ мкСм}$

Таблица 1.3 – Схемы замещения и расчётные формулы для их моделирования в ПВК RastrWin.

Тип трансформатора	Схема замещения	Выражения для расчёта параметров модели для ПВК
<p style="text-align: center;">1</p> <p>Двухобмоточный трансформатор (двухобмоточный автотрансформатор)</p> 	<p style="text-align: center;">2</p> 	<p style="text-align: center;">3</p> $r_T = \frac{\Delta P_k U_{ном}^2}{S_{ном}^2} \quad x_T = \frac{U_{k\%} U_{ном}^2}{100 S_{ном}}$ $g_T = \Delta P_x / U_{ном}^2 \quad \text{или} \quad b_T = \frac{I_{x\%} S_{ном}}{100 U_{ном}^2}$ $K_{ТНВ} = \frac{U_{НН}}{U_{ВН}}$
<p>Двухобмоточный трансформатор с расщеплённой обмоткой, каждая из которых работает на собственную нагрузку</p> 		$g_T = \Delta P_x / U_{ном}^2 \quad b_T = \Delta Q_x / U_{ном}^2$ $K_{ТВном} = 1 \quad K_{ТНВ1} = \frac{U_{НН1}}{U_{ВН}} \quad K_{ТНВ2} = \frac{U_{НН2}}{U_{ВН}}$ $r_{ТВ} = 0,5 \frac{\Delta P_k U_{ном}^2}{S_{ном}^2} \quad r_{ТН1} = r_{ТН2} = \frac{\Delta P_k U_{ном}^2}{S_{ном}^2}$ $x_{ТВ} = 0,5 \frac{U_{k\%} U_{ном}^2}{100 S_{ном}} \quad x_{ТН1} = x_{ТН2} = \frac{U_{k\%} U_{ном}^2}{100 S_{ном}}$

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3
<p>Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)</p> 		$g_T = \Delta P_x / U_{ном}^2 \quad b_T = \Delta Q_x / U_{ном}^2$ $K_{TBном} = 1 \quad K_{TCB} = \frac{U_{CH}}{U_{BH}} \quad K_{THB} = \frac{U_{HH}}{U_{BH}}$ $r_{TB} = 0,5 \frac{\Delta P_k U_{ном}^2}{S_{ном}^2}$ $x_{TB} = \frac{U_{kB\%} U_{ном}^2}{100 S_{ном}} \quad x_{TC} = \frac{U_{kC\%} U_{ном}^2}{100 S_{ном}} \quad x_{TH} = \frac{U_{kH\%} U_{ном}^2}{100 S_{ном}}$ $U_{KB} = 0,5 (U_{K, \text{в-с}} + U_{K, \text{в-н}} - U_{K, \text{с-н}})$ $U_{KC} = 0,5 (U_{K, \text{в-с}} + U_{K, \text{с-н}} - U_{K, \text{в-н}})$ $U_{KH} = 0,5 (U_{K, \text{в-н}} + U_{K, \text{с-н}} - U_{K, \text{в-с}})$

Для моделирования КЛ, ВЛ и двухобмоточных трансформаторов в ПВК RastrWin необходимо задать два узла в таблице «Узлы», а параметры схемы замещения необходимо ввести в ветвь между заданными узлами в таблице «Ветви».

Для моделирования трёхобмоточных трансформаторов, автотрансформаторов и трансформаторов с расщепленной обмоткой необходимо предварительно задать четыре узла. Полная схема замещения такого элемента будет состоять из трёх ветвей.

Батареи конденсаторов и шунтирующие реакторы задаются в ПВК RastrWin таблице «Узлы» через задание проводимостей шунта. Проводимость шунта вводится в ПВК в микросименсах и рассчитывается предварительно по выражению:

$$B_{Ш} = \frac{Q_{ном}}{U_{ном}^2}, \quad (1.1)$$

где  $Q_{ном}$  - номинальная мощность устройства (БСК или ШР);

$U_{ном}^2$  - номинальное напряжение.

Проводимость шунта, моделирующего БСК, задаётся со знаком «-», а ШР со знаком «+».

Ввод схемы рекомендуется начинать с данных по узлам. Минимально необходимой информацией для каждого узла является его номер (**Номер**) и номинальное напряжение (**U\_ном**). Далее заполняется таблица Ветви с помощью которых моделируются ЛЭП и трансформаторы. При вводе данных по ветвям (пункт меню **Ветви**) задаются номера узлов, ограничивающих ветвь.

Разделение ветвей на ЛЭП и трансформаторы осуществляется программой по значению, проставленному в поле **К\_Т/r** (коэффициент трансформации): для ЛЭП это поле может оставаться пустым или заполняться нулем, для трансформаторов – обязательно заполняется значением (даже если это единица!). При вводе данных о трансформаторных ветвях важен порядок задания номеров узлов, которые их ограничивают. Первым (поле **N\_нач**) должен стоять номер узла, к напряжению которого приведено сопротивление, чаще всего это узел высшего напряжения, тогда вторым (поле **N\_кон**) будет номер узла низшего напряжения. Коэффициент трансформации – отношение напряжения узла **N\_кон** к напряжению узла **N\_нач**, то есть это, как правило, отношение низшего напряжения к высшему.

Часть перечисленных параметров в таблице скрыта, изменить их видимость можно с помощью меню, вызываемого щелчком правой кнопки мыши на заголовке соответствующего столбца – «Выбор колонок» [7].

## **ПЕРЕЧЕНЬ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Для выполнения лабораторной работы необходимо:

ПК с установленной системой компьютерной математики MathCad или любым средством для расчёта параметров моделей элементов ЭЭС и с установленным программным комплексом RastrWin 2.45 или RastrWin 3.

### **ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ.**

1. Выполняется расчёт параметров схем замещения для двух и трёхобмоточного трансформаторов, а так же для воздушной и кабельной линий электропередач, согласно варианту задания.
2. Выполняется нумерация каждого элемента для задания в ПВК RastrWin натуральными цифрами от 1 до 2 147 483 647 [7].
3. Моделирование всех элементов в ПВК RastrWin и сохранение в формате \*.rg2.
4. Представление каждого элемента в графической форме \*.grf.
5. Оформление отчёта по лабораторной работе.

### **ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ**

В отчёте по лабораторной работе необходимо представить схему замещения с рассчитанными параметрами, таблицу «Узлы» из ПВК RastrWin с заданными параметрами, таблицу «Ветви» из ПВК RastrWin с заданными параметрами и графическое представление каждого элемента из ПВК RastrWin.

### **ВЫВОДЫ**

В результате выполнения лабораторной работы закрепляются теоретические навыки по расчёту параметров схем замещения элементов ЭЭС для их моделирования при выполнении расчётов электрических режимов.

### **ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.**

1. Схема замещения двухобмоточного трансформатора для ПВК RastrWin?
2. Схема замещения трёхобмоточных трансформаторов для ПВК RastrWin?
3. Представление схемы замещения КЛ и ВЛ различных классов номинального напряжения?
4. Принцип задания БСК и ШР в ПВК RastrWin?

## Лабораторная работа № 2

### 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 1, согласно варианту задания:

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

#### 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 [8].

В зависимости от состояния электрической сети и генерирующего оборудования среди установившихся режимов принято выделять [12,13]: *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 [13] 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.

Расчет начинается с составления схемы замещения электрической сети (линии замещаются П-образной схемой, трансформаторы — Г-образной) и определения ее параметров. Для каждой линии рассчитываются активное и реактивное (индуктивное) сопротивления и емкостная реактивная проводимость (для всех линий напряжением 110 кВ и выше). Для трансформаторов подстанций, подключенных к сети, находятся активное и реактивное сопротивления и активные и индуктивные проводимости.

Ввод схемы необходимо начинать с данных по узлам. Минимально необходимой информацией для каждого узла является его номер (**Номер**) и номинальное напряжение (**U\_ном**)[7].

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 связанной 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 выбирается либо по данным контрольных замеров, либо по рекомендациям [13].

Согласно п. 5.33 [13] при выполнении расчетов установившихся режимов следует руководствоваться следующим:

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 заданных вариантах сети на шинах НН подстанций необходимо задать нагрузку. Для этого в узлах, моделирующих эти шины, требуется дополнительно ввести активную и реактивную мощность потребления ( $P_n$ ,  $Q_n$ ) в МВт. В расчётах установившихся режимов, выполняемых на производстве, нагрузки принимаются по результатам контрольных замеров, либо по результатам телеизмерений.

В рамках настоящей лабораторной работы рекомендуется рассчитать нагрузку по выражениям:

$$P_n = S_{TPном} \cdot 0,5, \quad (2.1)$$

$$Q_n = P_n \cdot 0,4, \quad (2.2)$$

где  $S_{TPном}$  - номинальная мощность трансформатора, МВА.

Расчёт  $Q_n$  основан на рекомендаций [13].

Генераторные узлы могут задаваться моделью  $P, Q = \text{const}$  или моделью  $P, U = \text{const}$ . В первом случае в узле необходимо задать  $P_g$  и  $Q_g$ , при этом напряжение в данном узле будет **зависимой** величиной.

Во втором случае в генераторном узле необходимо задать  $P_g, V_{зд}$ , 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  $P, Q = \text{const}$ .

Для моделирования синхронных компенсаторов в узле необходимо задать  $V_{зд}$ , а так же пределы изменения реактивной мощности ( $Q_{min}, Q_{max}$ ). Графа  $P_g$  при этом не заполняется ( $P_g=0$ ).


Далее моделируются ветви схемы замещения (см. Лабораторная работа №1).

После ввода параметров всех узлов и всех ветвей расчетная схема считается законченной.

Подготовка графической схемы осуществляется на основе предварительно занесённой расчетной схемы (Узлы и Ветви) и заключается в последовательном выполнении следующих операций:

- 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.

Исходя из особенностей хранения графической схемы, рекомендуется эти действия выполнять в указанной последовательности.


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.

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

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

Узел также можно изобразить в виде точки (удерживать 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** . Нужно переместить мышь на место присоединения к шине узла изображения нагрузки, генератора, реактора или ветви, нажать левую клавишу мыши, переместить мышь в нужное место вдоль шины узла и отпустить клавишу мыши.

Получить более подробную информацию о применении графического интерфейса RastrWin можно в разделе Помощь/Справка [7].

После изображения модели для расчёта режима на графической схеме выполняется расчёт режима Расчёты/Режим (или F5).

При отклонении напряжений на шинах НН от номинальных значений на величину большую  $\pm 5\%$  необходимо произвести дополнительное регулирование напряжения.

Для этого необходимо внести устройства РПН и ПБВ в таблицу анцапф: Открыть/Оптимизация/Анцапфы.

В таблице «Ветви» внести соответствующие ссылки на требуемые номера анцапф и изменить текущий номер анцапфы для изменения напряжений на шинах НН подстанций.

При недостаточности диапазонов регулирования устройств РПН и ПБВ применить БСК.

В результате выполнения лабораторной работы необходимо получить схему потокораспределения в виде аналогично рисунку 2.1.

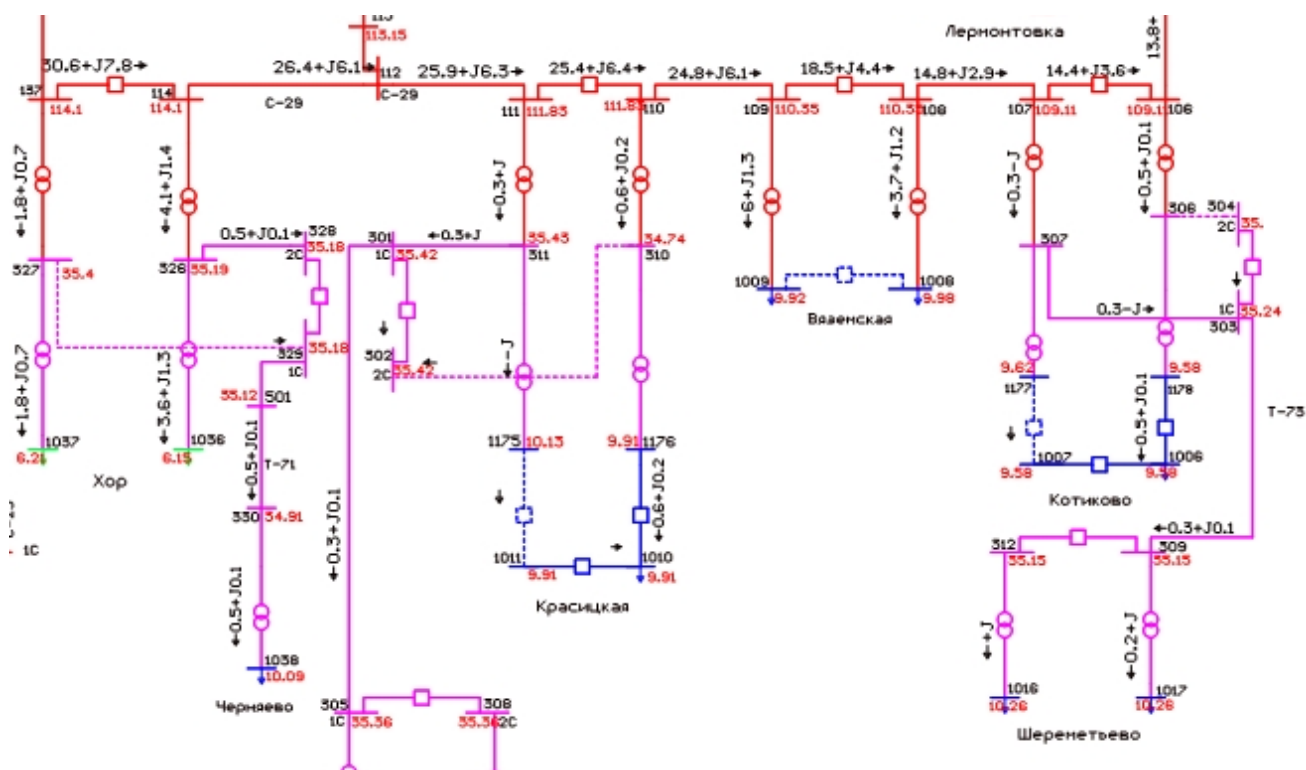


Рисунок 2.1 – Пример схемы потокораспределения.

## ПЕРЕЧЕНЬ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Для выполнения лабораторной работы необходимо:

ПК с установленной системой компьютерной математики MathCad или любым средством для расчёта параметров моделей элементов ЭЭС.

ПК с установленным программным комплексом RastrWin 2.45 или RastrWin 3.

### ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Выполняется расчёт параметров схем замещения для всех элементов, приведённых на схеме. Рассчитываются нагрузки всех ПС из условия 50% загрузки каждого трансформатора.
2. Составляется схема замещения для рассматриваемого участка сети.
3. Вводится расчётная схема (модель электрической сети) заданной сети в ПВК 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.
7. Выполняется расчёт потерь активной и реактивной мощностей в рассматриваемой сети, проводится анализ эффективности её работы.
8. Оформляется отчёт по лабораторной работе.

#### **ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ.**

В отчёте по лабораторной работе необходимо представить схему замещения с рассчитанными параметрами (согласно ГОСТ по оформлению), таблицу узлы из ПВК RastrWin с заданными параметрами, таблицу ветви из ПВК RastrWin с заданными параметрами, таблицу Анцапфы и графическую схему моделируемой сети в ПВК RastrWin.

#### **ВЫВОДЫ**

В результате выполнения лабораторной работы закрепляются практические навыки расчётов электрических режимов, анализа потерь мощности, составления схем потокораспределения и регулирования напряжений в сети с помощью устройств РПН, ПБВ и БСК.

#### **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?

### Лабораторная работа № 3

#### СИМ МОДЕЛИ В ПВК RASTRWIN

**Цель работы:** изучение модуля «Коммутационные схемы» в программном комплексе RastrWin, самостоятельное создание коммутационной схемы.

#### ЗАДАНИЕ

В лабораторной работе необходимо создать коммутационную модель для указанной в задании схемы в ПВК RastrWin.

В исходных данных указан номер схемы, тип распределительного устройства (РУ) каждой подстанции (ПС) и число цепей (n), соединяющих ПС и ЭС между собой

Исходные данные, необходимые для выполнения лабораторной работы, приведены в таблице 3.1.

Варианты схем изображены на рисунке 3.1.

Схему распределительного устройства ЭС во всех вариантах принять – Одна рабочая секционированная выключателем система шин (без трансформаторов). Со стороны ЭС дополнительно подходит одна ЛЭП. На ПС 1, ПС 2, ПС 3 принять по два трансформатора с низшим напряжением 10 кВ.

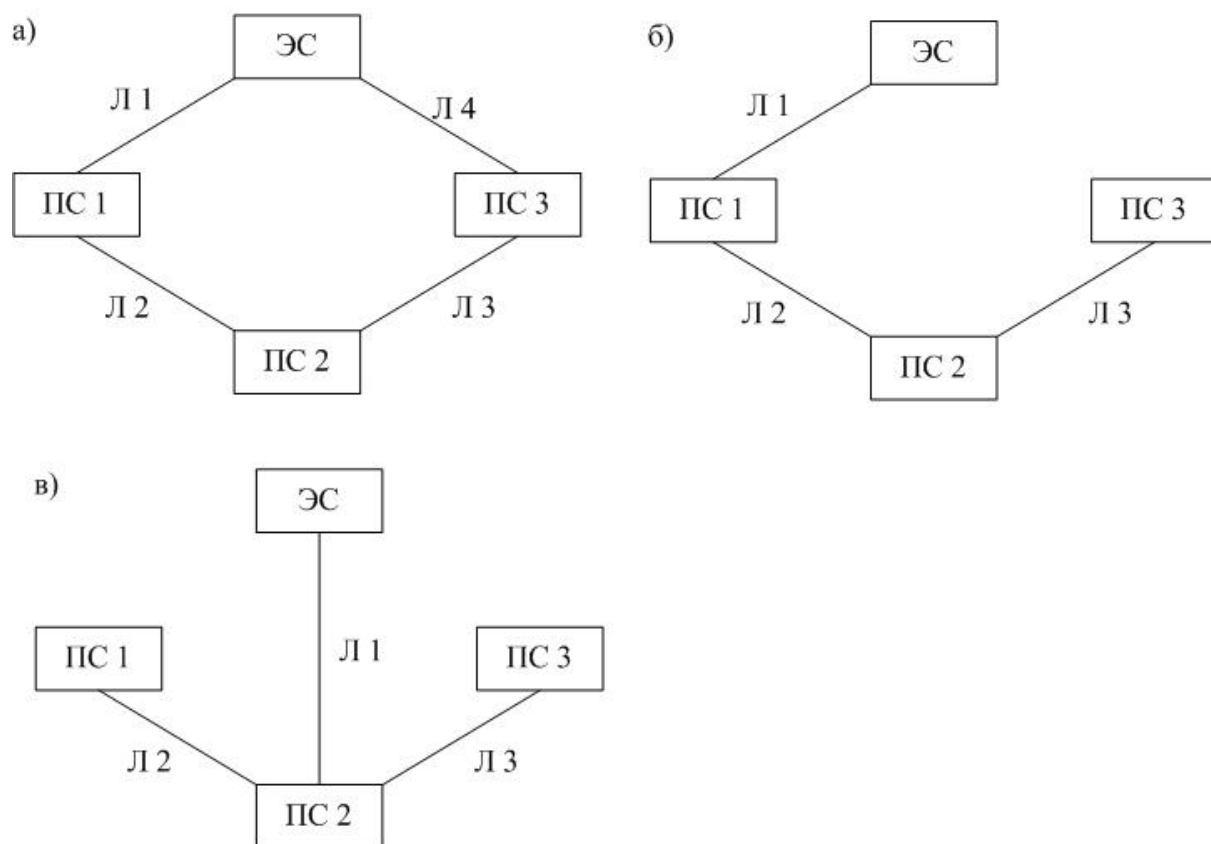


Рисунок 3.1 – Схемы взаимного расположения ПС

Таблица 3.1 – Исходные данные для выполнения лабораторной работы

№ в-та	№ схемы	U <sub>ном</sub> ВН, кВ	РУ ПС1	РУ ПС2 (номер схемы)	РУ ПС3	Число цепей			
						Л1	Л2	Л3	Л4
1	2		3	4	5	6	7	8	9
1	1а	110	13-Две рабочие системы шин	8-Шестиугольник	9 – одна рабочая секционированная выключателем система шин.	1	2	2	3
2	1а	220	9 – одна рабочая секционированная выключателем система шин.	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов	9Н-Одна рабочая секционированная по числу трансформаторов система шин с подключением трансформаторов к секциям шин через развилку из выключателей	2	1	1	2
3	1а	330	17-Полуторная схема	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	5Н-Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий	2	2	1	1
4	1а	330	8-Шестиугольник	16-Трансформаторы -шины с полуторным присоединением линий	15- Трансформаторы шины с присоединением линий через 2 выключателя	2	2	2	2
5	1а	220	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов	13Н-Две рабочие и обходная системы шин	13-Две рабочие системы шин	1	1	2	1
6	1б	500	17-Полуторная схема	7-Четырехугольник	3Н-Блок (линия трансформатор) с выключателем	2	1	1	-
7	1б	500	15- Трансформаторы шины с присоединением линий через 2 выключателя	17-Полуторная схема	16-Трансформаторы -шины с полуторным присоединением линий	2	1	3	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
8	1б	110	9 – Одна рабочая секционированная выключателем система шин.	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии	2	2	2	-
9	1б	220	9АН-Одна рабочая секционированная система шин с подключением ответственных присоединений через «полупотрную» цепочку	16-Трансформаторы -шины с полупотрным присоединением линий	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии	3	2	2	-
10	1б	110	12Н-Одна рабочая секционированная выключателями и обходная системы шин с подключением трансформаторов к секциям шин через развилку из выключателей	9Н-Одна рабочая секционированная по числу трансформаторов система шин с подключением трансформаторов к секциям шин через развилку из выключателей	3Н-Блок (линия трансформатор) с выключателем	2	2	1	-
11	1в	35	3Н-Блок (линия трансформатор) с выключателем	9 – Одна рабочая секционированная выключателем система шин.	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии	2	1	2	-
12	1в	330	7-Четырехугольник	16-Трансформаторы -шины с полупотрным присоединением линий	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии	2	2	2	-
13	1в	220	7-Четырехугольник	14-Две рабочие секционированные выключателями и обходная системы шин с двумя обходными и двумя шиносоединительными выключателями	3Н-Блок (линия трансформатор) с выключателем	3	2	1	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
14	1в	500	3Н-Блок (линия трансформатор) с выключателем	15- Трансформатор-шины с присоединением линий через два выключателя	7-Четырехугольник	2	1	2	-
15	1в	150	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	3Н-Блок (линия трансформатор) с выключателем	2	2	1	-
16	1а	750	17-Полуторная	схема 16-Трансформаторы -шины с полуторным присоединением линий	15- Трансформатор-шины с присоединением линий через два выключателя	3	3	3	3
17	1а	750	6Н-Треугольник (один АТ на ПС)	15- Трансформатор-шины с присоединением линий через два выключателя	16-Трансформаторы -шины с полуторным присоединением линий	1	1	3	4
18	1а	220	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	14-Две рабочие секционированные выключателями и обходная системы шин с двумя обходными и двумя шиносоединительными выключателями	12Н-Одна рабочая секционированная выключателями и обходная системы шин с подключением трансформаторов к секциям шин через развилку из выключателей	4	3	4	3
19	1а	110	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	9 – Одна рабочая секционированная выключателем система шин.	9АН-Одна рабочая секционированная система шин с подключением ответственных присоединений через «полуторную» цепочку	2	4	3	2
20	1а	330	8-Шестиугольник	15- Трансформатор-шины с присоединением линий через два выключателя	17-Полуторная схема	2	2	2	4
21	1б	35	9 – Одна рабочая секционированная выключателем система шин	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов	3Н-Блок (линия трансформатор) с выключателем	2	1	1	-



Продолжение таблицы 3.1

1	2		3	4	5	6	7	8	9
22	1б	220	13-Две рабочие системы шин	13Н-Две рабочие и обходная системы шин	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической переключкой со стороны линии	2	1	2	-
23	1в	500	17-Полуторная	3Н-Блок (линия трансформатор) с выключателем	6Н-Треугольник (2 АТ)	2	1	1	-
24	1в	110	14-Две рабочие секционированные выключателями и обходная системы шин с двумя обходными и двумя шиносоединительными выключателями	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической переключкой со стороны линии	3Н-Блок (линия трансформатор) с выключателем	3	2	1	-
25	1в	35	9 – Одна рабочая секционированная выключателем система шин	3Н-Блок (линия трансформатор) с выключателем	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической переключкой со стороны линии	2	1	2	-

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Расчётная схема сети, реализованная в ПВК RastrWin, традиционно приближена к расчетной модели. В общем случае представление схемы электрической сети в ПК происходит по упрощенной форме, шины электростанций и подстанций представлены одним узлом, а присоединения к ним не имеют в расчетной модели коммутационных аппаратов.

Модуль работы с коммутационными схемами, входящий в ПВК RastrWin3, содержит графический редактор схем и дает возможность создать подробные схемы распределительных устройств подстанций. Кроме этого в модуле реализованы алгоритмы, осуществляющие привязку схем подстанций к узлам расчетной модели и актуализацию расчетной схемы при изменении параметров коммутационной модели сети.

Форматом моделирования коммутационных схем был выбран признанный и широко известный в мире стандарт CIM (Common Information Model). Стандарт (модель) разработан рабочей группой института EPRI и признан стандартом МЭК.

Обобщенная информационная модель есть абстрактная модель, которая все множество элементов электроэнергетической системы представляет стандартным образом в виде описания объектов, их свойств и связей между ними. Такое единое описание позволяет осуществлять интеграцию различных приложений, выполненных независимыми изготовителями.

По существу CIM представляет собой информационную модель, задачей которой является единое унифицированное представление структур данных, независимо от источника происхождения данных и целей их использования. CIM представление включает в себя такие общие абстрактные элементы, как классы, объекты, свойства, методы и ассоциации.

Модуль дает возможность гибко настраивать работу топологического процессора и редактора схем, что позволит пользователю не вникать в особенности CIM модели[19].

Современные требования представления и использования информации в интегрированных информационных системах делают целесообразным использование новой информационной технологии - так называемых CIM-систем. Она представляет собой некоторую концептуальную модель для описания различных предметов (субъектов) окружающего мира, используя объектно-ориентированную терминологию.

По существу CIM представляет собой информационную модель, задачей которой является единое унифицированное представление структур данных, независимо от источника происхождения данных и целей их использования.

С помощью средств работы с коммутационными схемами в RastrWin 3 можно более детально оценить результаты расчетов, проследить состояние коммутационных аппаратов и другого оборудования.

Для удобства пользователей в RastrWin 3 предусмотрено как независимое создание CIM модели, так и импорт моделей коммутационных схем из ПК «Космос» и SCADA/EMS PowerCC (Siemens). При импорте схем из ПК «Космос» возможен перенос, как отдельных подстанций, так и всей схемы сети этого формата, чтобы впоследствии смоделировать на ее базе расчетную модель или привязать к уже существующей [19].

Модуль выключает алгоритм, позволяющий на базе существующей расчетной модели синтезировать коммутационную модель минимальной детализации. Достоинство такого подхода заключается в том, что созданная коммутационная модель уже привязана к расчетной и содержит минимальный набор оборудования (тот, который возможно получить из расчетной схемы) с параметрами схем замещения. Далее пользователь может начать работу по уточнению схем и повышению их детализации, причем, как указано выше, это можно делать как с помощью встроенного редактора схем, так и выборочно импортируя и замещая схемы подстанций.

Реализованный редактор схем имеет два режима работы со схемами: режим полной схемы сети, который позволяет отобразить всю схему сети или ее фрагмент, и режим редактирования выбранной подстанции. Общая схема сети в формате коммутационной схемы приведена на рисунке 3.2.

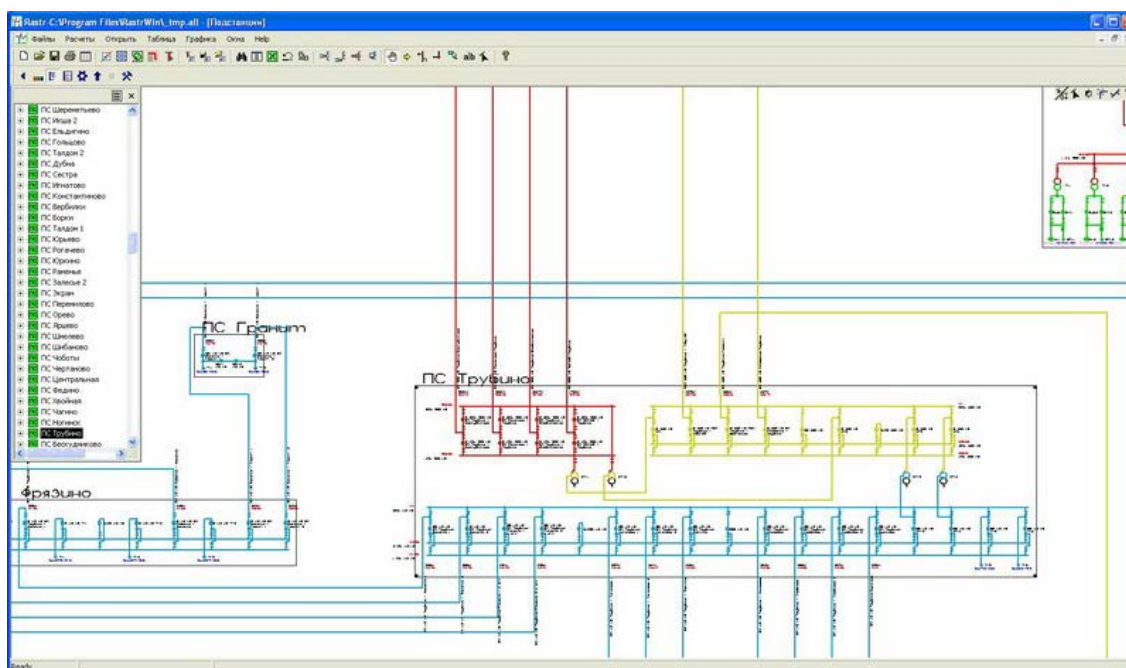


Рисунок 3.2 – Схема сети в формате коммутационной схемы

Доступны удобные методы навигации, контекстные переходы между подстанциями и элементами. В режиме полной схемы для каждой подстанции можно задавать индивидуальный масштаб. В режиме редактирования подстанции реализован алгоритм построения ортогональных связей между объектами подстанций на нерегулярной сетке, который при определенных навыках работы позволит ускорить процесс рисования схем [19]. В режиме редактирования ПС интерфейс программы имеет вид аналогичный рисунку 3.3.

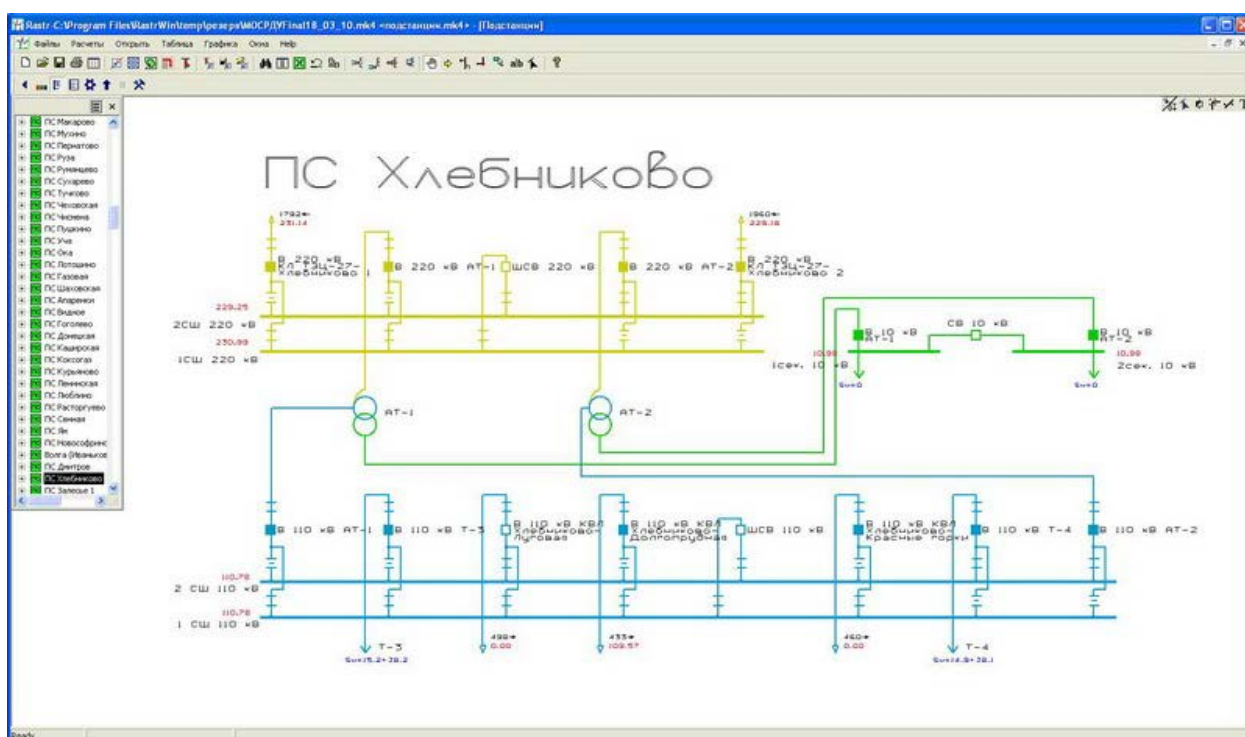


Рисунок 3.3 – Схема одной подстанции в формате коммутационной схемы

Основным элементом СИМ является схема, с помощью которой описывается информационная модель объекта. Схема является формальным определением модели.

### **ПЕРЕЧЕНЬ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Для выполнения лабораторной работы необходимы:

1. ПК с установленным ПВК RastrWin 3.
2. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ [14]
3. RastrWin3. Документация пользователя (коммутационные схемы).

### **ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ.**

1. Согласно варианта задания составить подробную однолинейную схему электрической сети (оформить согласно ГОСТ).

2. Создать в ПВК RastrWin 3 коммутационную модель соответствующую составленной однолинейной схеме сети.

### **ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ**

В отчёте по лабораторной работе необходимо представить описание заданной схемы, подробную однолинейную схему электрической сети, оформленную по требованиям ГОСТ, коммутационную модель из ПВК RastrWin 3.

### **ВЫВОДЫ**

Современный уровень развития энергосистем, управление технологическими режимами работы объектов электроэнергетики, сопровождение вывода в ремонт объектов электросетевого хозяйства, а также ввода их после ремонта, необходимость обеспечения высокого уровня надежности функционирования энергосистемы требуют более развернутого представления расчетной модели энергосистем путем формирования коммутационных схем распределительных устройств электрических станций и подстанций.

Наличие коммутационного слоя значительно расширяет возможности и, одновременно, упрощает процедуры, выполняемые при изменении конфигурации расчетной модели электрической сети.

В результате выполнения лабораторной работы закрепляются теоретические навыки по разработке однолинейных схеме подстанций, вырабатываются практические навыки по подготовке коммутационных схем в ПВК RastrWin 3.

### **ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.**

1. Что такое СИМ модель?
2. Назначение и применение СИМ моделей в энергетике?
3. Основные схемы РУ ВН, применяемые при двух подходящих ЛЭП и двух трансформаторах на ПС?
4. Схема РУ ВН, применяемая при двух подходящих ЛЭП и одном трансформаторе на ПС?
5. Основные схемы РУ ВН , применяемые при пяти и более подходящих ЛЭП?
6. Основные схемы РУ ВН, применяемые при одной подходящей ЛЭП?

## Лабораторная № 4

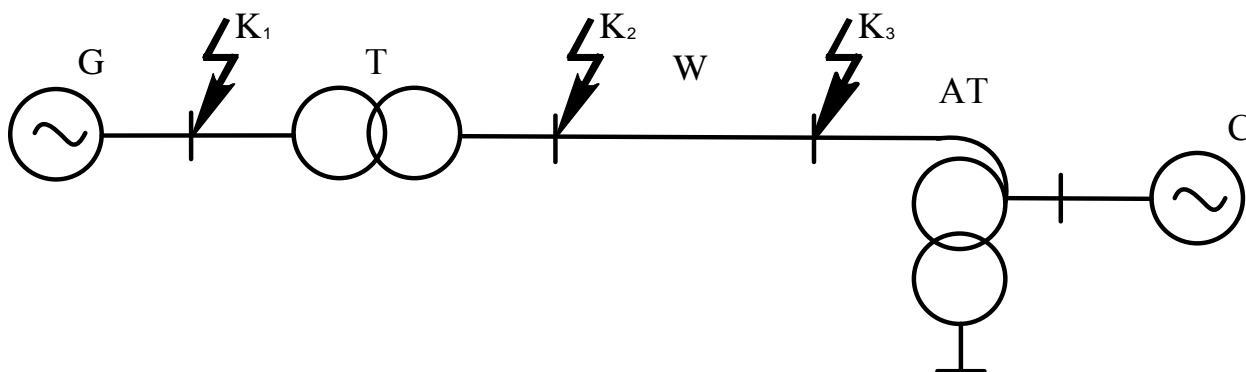
### РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ПВК RASTRWIN.

**Цель работы:** практическое выполнение расчёт токов короткого замыкания в ПВК RastrWin3 (RastrKZ).

#### ЗАДАНИЕ

Для обобщённой схемы, приведённой на рисунке 4.1, по параметрам, приведённым в таблице 4.1 согласно заданного варианта выполнить следующее:

1. Подготовить однолинейную схему электрической сети (оформление по ГОСТ).
2. Составить схемы замещения для расчёта токов симметричного и несимметричных коротких замыканий КЗ и рассчитать их параметры.
3. Смоделировать заданную сеть в RastrWin 3 для расчёта ТКЗ.
4. Рассчитать симметричные и все возможные несимметричные токи КЗ (предусмотренные программой). При расчёте однофазного КЗ считать, что нейтрали всех трансформаторов на электростанции Т и на приёмной подстанции АТ заземлены.
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 4.1 – Расчётная схема сети

Таблица 4.1 – Исходные данные для выполнения лабораторной работы по расчёту ТКЗ в ПВК RastrWin 3.

№ варианта	Параметры электрической станции				Параметры ЛЭП			Параметры приёмной подстанции		Параметры системы	Точка КЗ для расчёта
	Кол-во генераторов	Тип генераторов	Количество трансформаторов	Тип трансформаторов	Марка провода	Длина ЛЭП, км	Количество цепей ЛЭП	Кол-во АТ	Тип АТ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	ТГВ-500-4У3	1	ТЦ-630000/220	АС 300/67	50	2	2	АТДЦТН-250000/220/110	S <sub>кз</sub> =400 МВА	К1
										U <sub>НОМ</sub> =110 кВ	
2	1	ТВВ-220-2ЕУ3	1	ТДЦ-250000/220	АС 240/39	19	2	1	АТДЦТН-250000/220/110	S <sub>кз</sub> =300 МВА	К2
										U <sub>НОМ</sub> =110 кВ	
3	1	ТВМ-300-У3	1	ТДЦ-400000/220	АС 300/67	15	2	1	АТДЦТН-200000/220/110	S <sub>кз</sub> =250 МВА	К3
										U <sub>НОМ</sub> =110 кВ	
4	1	ТВФ-120-2У3	1	ТДЦ-125000/330	2 × АС 240/32	25	1	1	АТДЦТН-125000/330/110	S <sub>кз</sub> =100 МВА	К3
										U <sub>НОМ</sub> =110 кВ	
5	1	СВ-1260/235-60Т	1	ТДЦ-250000/220	АС 240/32	37	2	1	АТДЦТН-250000/220/110	S <sub>кз</sub> =300 МВА	К2
										U <sub>НОМ</sub> =110 кВ	
6	1	СВ-1500/175-84	1	ТДЦ-200000/220	АС 240/39	40	2	1	АТДЦТН-200000/220/110	S <sub>кз</sub> =400 МВА	К1
										U <sub>НОМ</sub> =110 кВ	
7	2	СВ-850/120-60	2	ТРДН-40000/110	АС 240/56	21	2	1	АТДЦТН-125000/220/110	S <sub>кз</sub> =250 МВА	К1
										U <sub>НОМ</sub> =220 кВ	

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8	1	СВ-1100/250-36У4	1	ТДЦ-400000/22073У1	4xAC 400/64	65	2	1	АОДЦТН-267000/750/220	Sk3=2000 МВА Uном=750 кВ	K2
9	1	ТВФ-63-2У3	1	ТРДН-63000/110	AC 240/56	25	2	1	АТДЦТН-63000/220/110	Sk3=400 МВА Uном=220 кВ	K1
10	1	ТВВ-220-2ЕУ3	1	ТДЦ-250000/220	AC 240/39	48	2	1	АТДЦТН-250000/220/110-75У1	Sk3=300 МВА Uном=110 кВ	K1
11	1	СВФ-1690/175-64	1	ТЦ-630000/500	3 × AC 300/66	85	1	1	АТДЦН-500000/500/220	Sk3=2500 МВА Uном=220 кВ	K2
12	1	ТГВ-800-2У3	1	ТЦ-1000000/500	3 × AC 400/51	90	1	2	АОДЦТН-417000/750/500	Sk3=2000 МВА Uном=750 кВ	K2
13	3	ТВВ-800-2ЕУ3	3	ТЦ-1000000/500	3 × AC 500/64	78	2	2	АОДЦТН-417000/750/500	Sk3=2500 МВА Uном=750 кВ	K1
14	1	ТВФ-120-2У3	1	ТДЦ-125000/330	2 × AC 240/32	38	1	1	АТДЦТН-125000/330/110	Sk3=300 МВА Uном=110 кВ	K2
15	1	СВ-1190/250-48	1	ТДЦ-250000/330	2 × AC 400/51	42	1	1	АТДЦТН-250000/330/150	Sk3=400 МВА Uном=150 кВ	K3
16	1	СВ-1436/200-80УХЛ4	1	ТДЦ-250000/500	3 × AC 400/51	65	1	1	АТДЦТН-250000/500/110	Sk3=2500 МВА Uном=110 кВ	K3
17	1	СВФ-830/225-28	1	ТДЦ-400000/500	3 × AC 400/51	75	1	1	АОДЦТН-417000/750/500	Sk3=2000 МВА Uном=750 кВ	K2
18	1	СВ-808/130-40У4	1	ТРДЦН-63000/110	AC 240/56	35	2	1	АТДЦТН-63000/220/110	Sk3=300 МВА	K1



Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
19	1	СВ-850/190-40	1	ТРДЦН-100000/220	АС 240/32	29	1	1	АТДЦТН- 125000/220/110	S <sub>к3</sub> =300 МВА U <sub>НОМ</sub> =110 кВ	К2
20	1	ТВФ-120-2У3	1	ТРДЦН-125000/110	АС 240/56	43	2	1	АТДЦТН- 125000/220/110	S <sub>к3</sub> =450 МВА U <sub>НОМ</sub> =220 кВ	К3
21	1	ТВВ-160-2ЕУ3	1	ТДЦ-200000/220	АС 300/39	35	2	1	АТДЦТН- 200000/220/110	S <sub>к3</sub> =300 МВА U <sub>НОМ</sub> =110 кВ	К3
22	1	ТВФ-63-2ЕУ3	1	ТРДЦН-63000/110	АС 185/24	50	2	1	АТДЦТН- 63000/220/110	S <sub>к3</sub> =400 МВА U <sub>НОМ</sub> =220 кВ	К2
23	1	СВ-1490/170- 96УХЛ4	1	ТДЦ-125000/110	АС 120/27	55	2	1	АТДЦТН- 125000/220/110	S <sub>к3</sub> =300 МВА U <sub>НОМ</sub> =220 кВ	К1
24	1	СВ-660/165-32	1	ТДЦ-80000/220	АС 240/32	65	2	1	АТДЦТН- 125000/220/110	S <sub>к3</sub> =400 МВА U <sub>НОМ</sub> =110 кВ	К2
25	2	ТВФ-120-2У3	2	ТРДЦН-125000/110	АС 240/56	46	2	1	АТДЦТН- 125000/220/110	S <sub>к3</sub> =450 МВА U <sub>НОМ</sub> =220 кВ	К3

## 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:

- 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 лабораторной 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 [3, 10]:

$$E''_{\phi} = \sqrt{\left(U_{\phi|q} + I_{|q} \cdot x''_d \cdot \sin \varphi_{|q}\right)^2 + \left(I_{|q} \cdot x''_d \cdot \cos \varphi_{|q}\right)^2}, \quad (4.1)$$

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

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

$\varphi_{|q}$  – 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:

$$E''_{\phi} = \sqrt{\left(U_{\phi|d} - I_{|d} \cdot x''_d \cdot \sin\varphi_{|d}\right)^2 + \left(I_{|d} \cdot x''_d \cdot \cos\varphi_{|d}\right)^2}. \quad (4.2)$$

Для синхронных компенсаторов, работавших до КЗ с перевозбуждением,

$$E''_{\phi} = U_{\phi|d} + I_{|d} \cdot x''_d, \quad (4.3)$$

Для синхронных компенсаторов, работавших до КЗ с недовозбуждением

$$E''_{\phi} = U_{\phi|d} - I_{|d} \cdot x''_d. \quad (4.4)$$

Для асинхронных электродвигателей сверхпереходную ЭДС следует определять по формуле

$$E''_{\phi} = \sqrt{\left(U_{\phi|d} - I_{|d} \cdot x'' \cdot \sin\varphi_{|d}\right)^2 + \left(I_{|d} \cdot x'' \cdot \cos\varphi_{|d}\right)^2}. \quad (4.5)$$

Для эквивалентного источника (системы)

$$E''_{\phi} = E_{\phi} = U_{\phi|d}, \quad (4.6)$$

для эквивалентной нагрузки

$$E''_{\phi} = 0,85 \cdot U_{\phi|d}. \quad (4.7)$$

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 4.2.

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.

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».

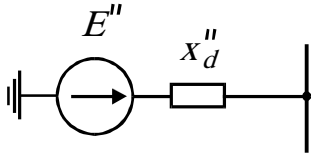
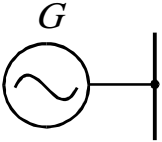
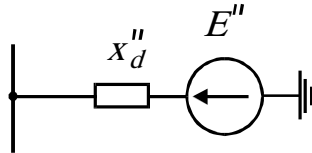
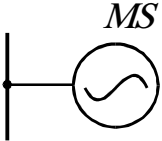
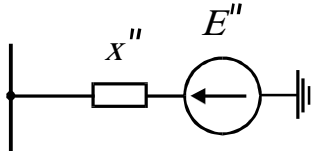
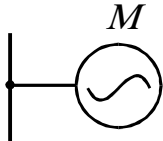
В RastrWin 3 место заземления нейтрали в расчётной схеме обозначается в таблице «Узы/Несим/ИД» в графе **Тип0**.

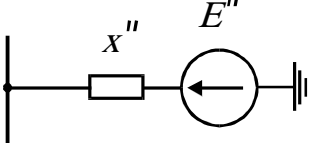
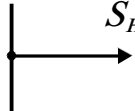
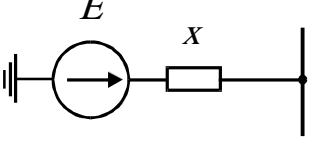
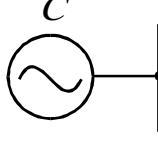
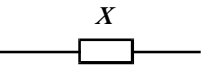
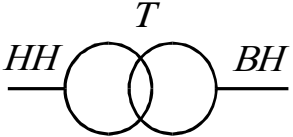
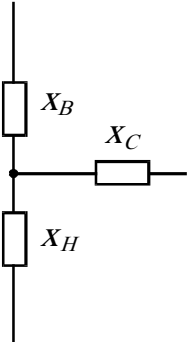
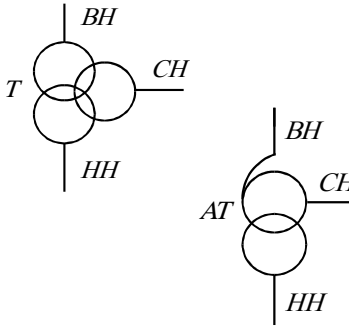
Значение «зак» – представляет собой землю в нулевой последовательности.

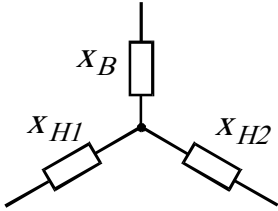
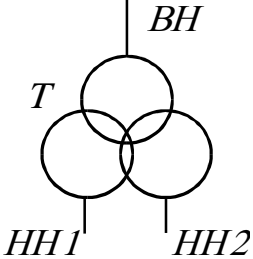
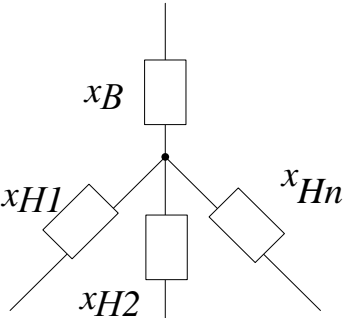
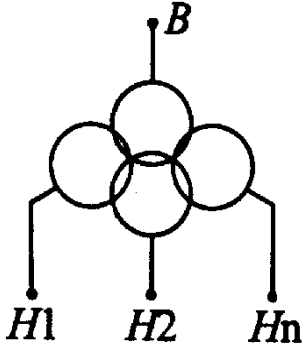
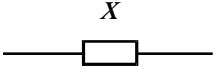
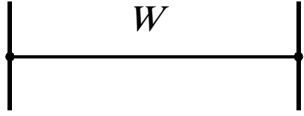
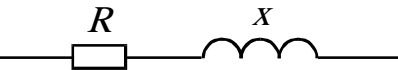
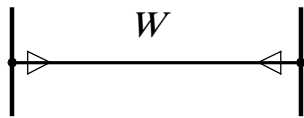
Значение «у» – представляет собой не заземлённый узел в нулевой последовательности [20].

Схема замещения нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме  $Y_0/\Delta$ , представлена на рисунке 4.2a. 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).

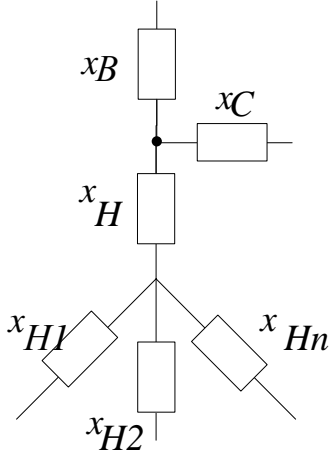
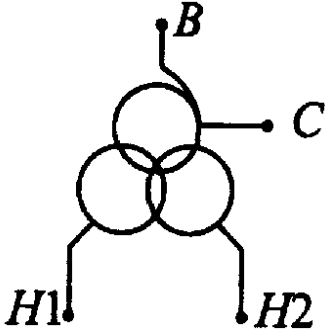
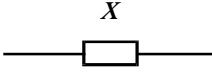
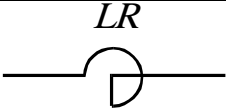
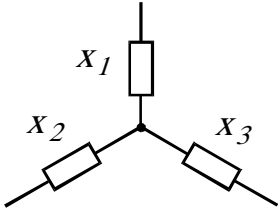
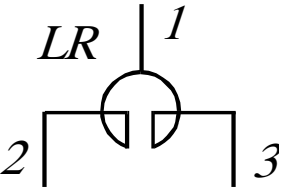
Таблица 4.2– Расчетные схемы и параметры расчетных схем элементов прямой последовательности

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			$X = X_d'' = X_{*d(НОМ)}'' \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}};$ $X_{*d(НОМ)}'' = \frac{1}{I_{*пуск}} \cdot \sqrt{1 - (M_{*пуск} / I_{*пуск})^2}$
Асинхронный двигатель			$X = X'' = X_{*(НОМ)}'' \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}};$ $X_{*(НОМ)}'' = \frac{1}{K_{II}}; \quad S_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\cos \varphi_{НОМ} \cdot \frac{\eta}{100}}$

1	2	3	4
Эквивалентная нагрузка			$X = X'' = 0,35 \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$
Эквивалентный источник (система)			$X = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot I_{от к.НОМ}} \text{ или } X = X_{к(НОМ)} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$
Двухобмоточный трансформатор			$X = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$
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>			$x_B = \frac{0,125 \cdot u_{KBH} \cdot U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМBH}}$ $x_{H1} = x_{H2} = \frac{1,75 \cdot u_{KBH} \cdot U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМBH}}$
<p>Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на n ветвей</p>			$x_B = 0,01 \cdot (U_{KB-H} - \frac{U_{KH1-Hn}}{2n})$ $x_{H1} = x_{H2} = x_{Hn} = 0,005 \cdot U_{KH1-Hn}$
<p>Воздушная линия электропередачи</p>			$X = X_l \cdot l$
<p>Кабельная линия электропередачи</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>			$x_1 = -k_{CB} \cdot X_{\text{НОМ}}$ $x_2 = x_3 = (1 + k_{CB}) \cdot X_{\text{НОМ}} \quad x_{\text{НОМ}}, k_{CB}$

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 4.2б). Поскольку у трансформаторов с номинальным напряжением обмоток свыше 1 кВ сопротивление  $X_{\mu 0}$  весьма значительно, то в схему замещения нулевой последовательности такие трансформаторы не вводят.

Схема замещения нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме  $Y_0/Y_0$ , представлена на рисунке 4.2в. 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  $X_{\mu 0} \gg X_I + X_{II}$ ).

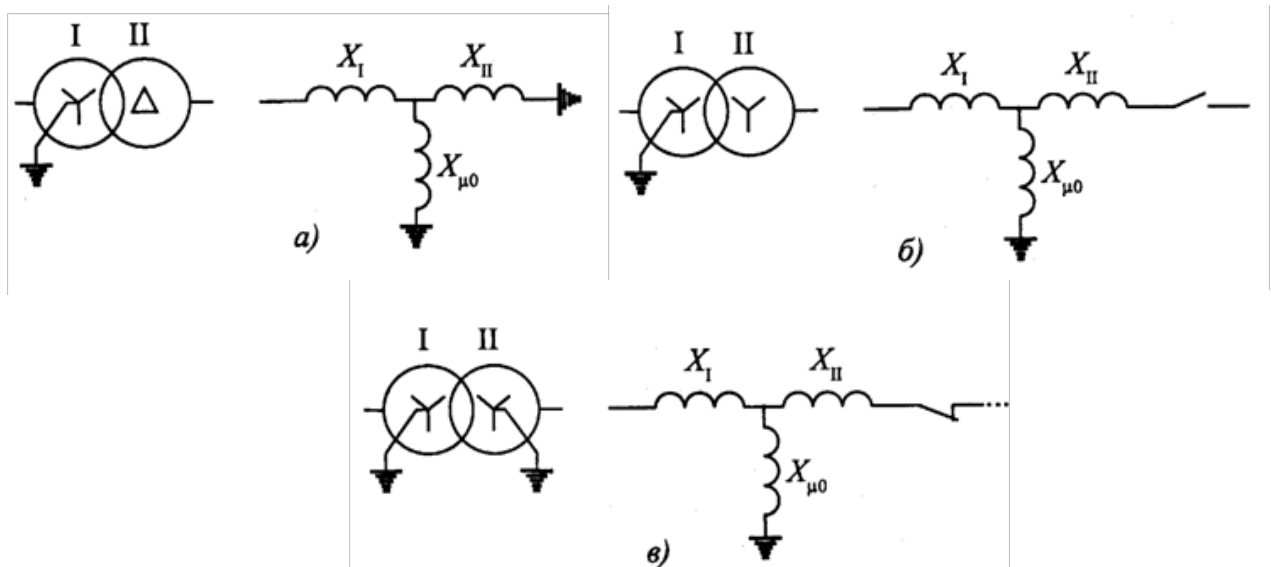


Рисунок 4.2 – Схемы замещения нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов

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 рис. 4.3 а. При этом сопротивление нулевой последовательности трансформатора  $X_{T0} = X_I + X_{II} // X_{III}$ .

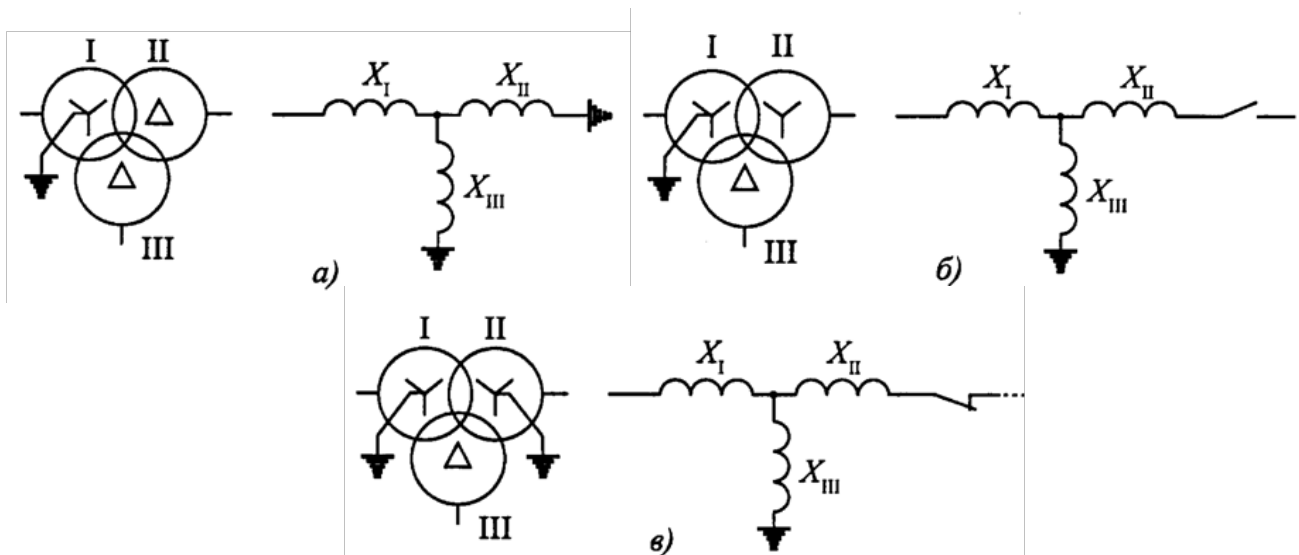


Рисунок 4.3 – Схемы замещения нулевой последовательности трехобмоточных трансформаторов

Если одна из них соединена треугольником, а другая соединена в звезду с изолированной нейтралью (рисунок 4.3 б), 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 (рисунок 4.3в) 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 4.3в).

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 приведенной 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 4.3.

Таблица 4.3 - 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 хорошопроводящих материалов	2,0
Двухцепная линия без заземленных тросов	5,5
То же, со стальными заземленными тросами	4,7
То же, с заземленными тросами из хорошопроводящих 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 лабораторной работе допускается использование приближенных методов расчёта элементов схем замещения.

### **ПЕРЕЧЕНЬ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Для выполнения лабораторной работы необходимо:

ПК с установленной системой компьютерной математики MathCad или любым средством для расчёта параметров моделей элементов ЭЭС.

ПК с установленным программным комплексом RastrWin 3 или RastrKZ.

### **ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ.**

1. Составляется однолинейная схема электрической сети, для которой будет выполняться расчёт ТКЗ (оформление по ГОСТ).

2. Составляется схема замещения для расчёта ТКЗ и рассчитываются её параметры.

3. В RastrWin 3 вводятся необходимые данные по узлам (Узлы/Несим/ИД), ветвям (Ветви/Несим/ИД) и генераторам (Генератор/Несим) для расчёта ТКЗ. Расчётный файл сохраняется с расширением \*.rst (динамика).

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

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 лабораторной 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 лабораторной 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 RastrWin KZ?
4. В каких единицах задаются данные в RastrWin KZ для расчёта ТКЗ?
5. Принципы составления схемы нулевой последовательности для расчёта ТКЗ?

## Лабораторная работа № 5

### 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДСТАНЦИЙ В MODEL STUDIO CS.

**Цель работы:** изучение принципов проектирования открытых распределительных устройств подстанций в Model Studio CS ОРУ.

#### ЗАДАНИЕ

1. На основании варианта задания (таблица 5.1) создать 3D-модель открытого распределительного устройства (ОРУ) в Model Studio CS ОРУ.

2. Провести расчет гибкой ошиновки в соответствии с требованием ПУЭ-7 (встроенными функциями программы Model Studio CS ОРУ);

3. Выполнить проверку допустимых габаритов (встроенными функциями программы Model Studio CS ОРУ).

Таблица 5.1 – Исходные данные для выполнения лабораторной работы

№ в-та	U <sub>ном</sub> ОРУ, кВ	Схема ОРУ
1	2	3
1	35	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий
2	110	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий
3	150	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий
4	220	4Н-Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий
5	35	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов
6	110	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов
7	150	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов
8	220	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов
9	35	5Н-Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий
10	110	5Н-Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий
11	150	5Н-Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий
12	220	5Н-Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий
13	35	3Н – Блок (линия-трансформатор) с выключателем
14	110	3Н – Блок (линия-трансформатор) с выключателем
15	150	3Н – Блок (линия-трансформатор) с выключателем
16	220	3Н – Блок (линия-трансформатор) с выключателем
17	500	3Н – Блок (линия-трансформатор) с выключателем

1	2	3
18	35	9 – одна рабочая секционированная выключателем система шин
19	110	9 – одна рабочая секционированная выключателем система шин
20	150	9 – одна рабочая секционированная выключателем система шин
21	220	9 – одна рабочая секционированная выключателем система шин
22	110	7-Четырехугольник
23	220	7-Четырехугольник
24	330	7-Четырехугольник
25	500	7-Четырехугольник

**Примечание:** примеры схемы открытых распределительных устройств приведены в приложении № 2.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

**Система автоматизированного проектирования (САПР)** — это организационно-техническая система, состоящая из совокупности комплекса средств автоматизации проектирования и коллектива специалистов подразделений проектной организации, выполняющая автоматизированное проектирование объекта, которое является результатом деятельности проектной организации.

Одним из наиболее прогрессивных систем, относящихся к САПР, являются продукты компании CSoft Development: Model Studio CS ОРУ, Model Studio CS Молниезащита, Model Studio CS ЛЭП, Model Studio CS Турбопроводы и др.[21].

Model Studio CS ОРУ – это специализированный продукт, работающий на платформе AutoCAD версии 2007 и старше. Используется для трехмерного проектирования открытых распределительных устройств, вводов воздушных линий электропередач на подстанции и прочие промышленные объекты. Продукт предназначен для автоматизации работ в проектных институтах и конструкторских отделах [18].

В Model Studio CS ОРУ реализован весь необходимый инструментарий для компоновки и выпуска проектной/рабочей документации по открытым распределительным устройствам, закрытым распределительным устройствам, расчета механической части гибких ошинок открытых распределительных устройств и вводов воздушных линий электропередач электрических станций и подстанций[2].

Преимущества у трехмерного моделирования перед другими способами визуализации довольно много. Трехмерное моделирование дает очень точную модель, максимально приближенную к реальности. Современные программы помогают достичь высокой детализации. При этом значительно увеличивается наглядность проекта. Выразить трехмерный объект в двухмерной плоскости не просто, тогда как 3D визуализации дает возможность тщательно проработать и что самое главное, просмотреть все детали. В трехмерную модель очень легко вносить практически любые изменения.

Специальные программы дают возможность интеграции с любым другим профессиональным программным обеспечением, например, с приложениями для инженерных расчетов или бухгалтерскими программами. Внедрение подобных решений на производстве дает существенную экономию ресурсов, значительно расширяет возможности предприятия, упрощает работу и повышает ее качество.

Интеллектуальные объекты Model Studio CS имеющие собственное поведение, использующие современные алгоритмы расчета и анализа позволяют проектировщику в реальном времени получать всю необходимую техническую информацию для принятия инженерных решений.

Для компоновки оборудования в трехмерном пространстве Model Studio CS ОРУ предоставляет все необходимые инструменты и функции. Они обеспечивают удобство работы и возможность проверки допустимых расстояний в любой момент и на любом этапе реализации проекта. Также имеется встроенная подсистема механического расчета проводов, поэтому автоматически рассчитывается длина провода, тяжения, стрелы провеса и прочие параметры и в результате отрисовывается кривая провисания провода. Механический расчет выполняется в соответствии с ПУЭ 7. Расчет выполняется не только с учетом свойств провода и климатических нагрузок, но и с учетом нагрузок от арматуры крепления, гирлянд и прочего оборудования и проводов[2].

Кривая провисания моделируется уравнением цепной линии, что позволяет увеличить точность результатов расчета. Подсистема расчета работает в режиме реального времени, т.е. в момент, когда провод нарисован расчет выполняется автоматически и обновляется каждый раз, когда изменяются условия. По результатам механического расчета определяются монтажные стрелы и тяжения провода, отчет по которым формируется по каждой ячейки открытого распределительного устройства.

В среду проектирования Model Studio CS ОРУ встроена обширная база данных оборудования, изделий и материалов, что позволяет повысить производительность и качество проектирования.

Модель, выполненная в Model Studio CS ОРУ, может содержать [18]:

- высоковольтное оборудование;
- гибкую (провода) и жесткую ошиновку;
- шкафы, щиты, пульты;
- порталы, опоры ВЛ;
- строительные и металлоконструкции;
- кабельные конструкции;



- вспомогательные элементы (мебель, обстановку, озеленение и малые архитектурные формы).

При оформлении проектных документов используются средства формирования видов и разрезов, подсистема автоматической простановки позиций, размеров и выносок, а также другие инструменты. В дополнение к правилам оформления, основанным на ГОСТ, пользователь может настроить собственные правила оформления разрезов и планов чертежа— для этого применяется специальный Мастер, который позволяет создавать, хранить, импортировать и экспортировать профили простановки размеров.

Программа выполняет следующие проверки:

- проверка допустимых расстояний между оборудованием;
- проверка допустимых расстояний между проводами и оборудованием;
- проверка допустимого расстояния между проводами.

Пример отображения недопустимого габарита приведён на рисунке 5.1.

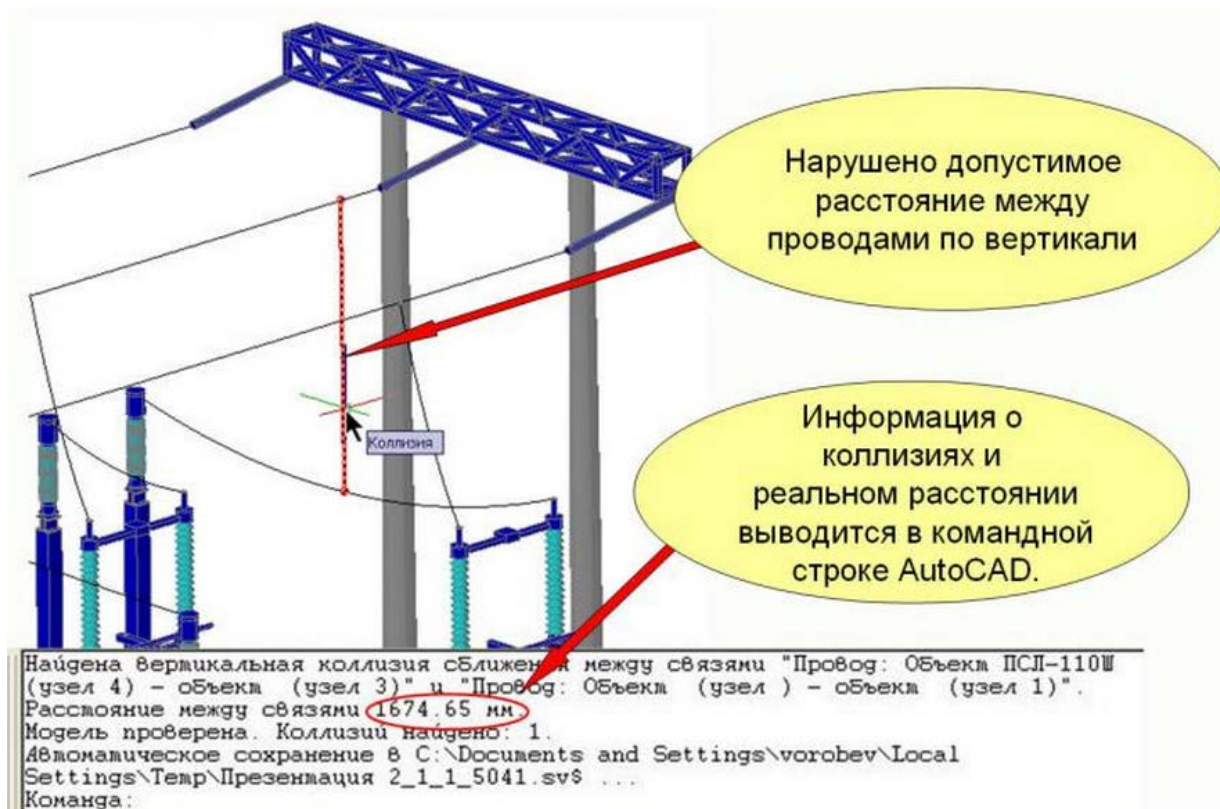


Рисунок 5.1 - Проверка допустимых габаритов

По умолчанию профиль коллизий в Model Studio CS OPU настроен в соответствии с таблицей 4.2.54 ПУЭ-7, что позволяет сразу же приступить к работе с ним.

В результате проектирования в Model Studio CS OPU можно получить план расстановки оборудования в виде 3D модели - рисунок 5.2.

## ПЕРЕЧЕНЬ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Для выполнения лабораторной работы необходимо:

ПК с установленным программным комплексом Autodesk AutoCAD и Model Studio CS Открытые распределительные устройства.

Однолинейная схема заданной подстанции согласно [14].

Типовая планировка подстанции заданного распределительного устройства [6, 17]

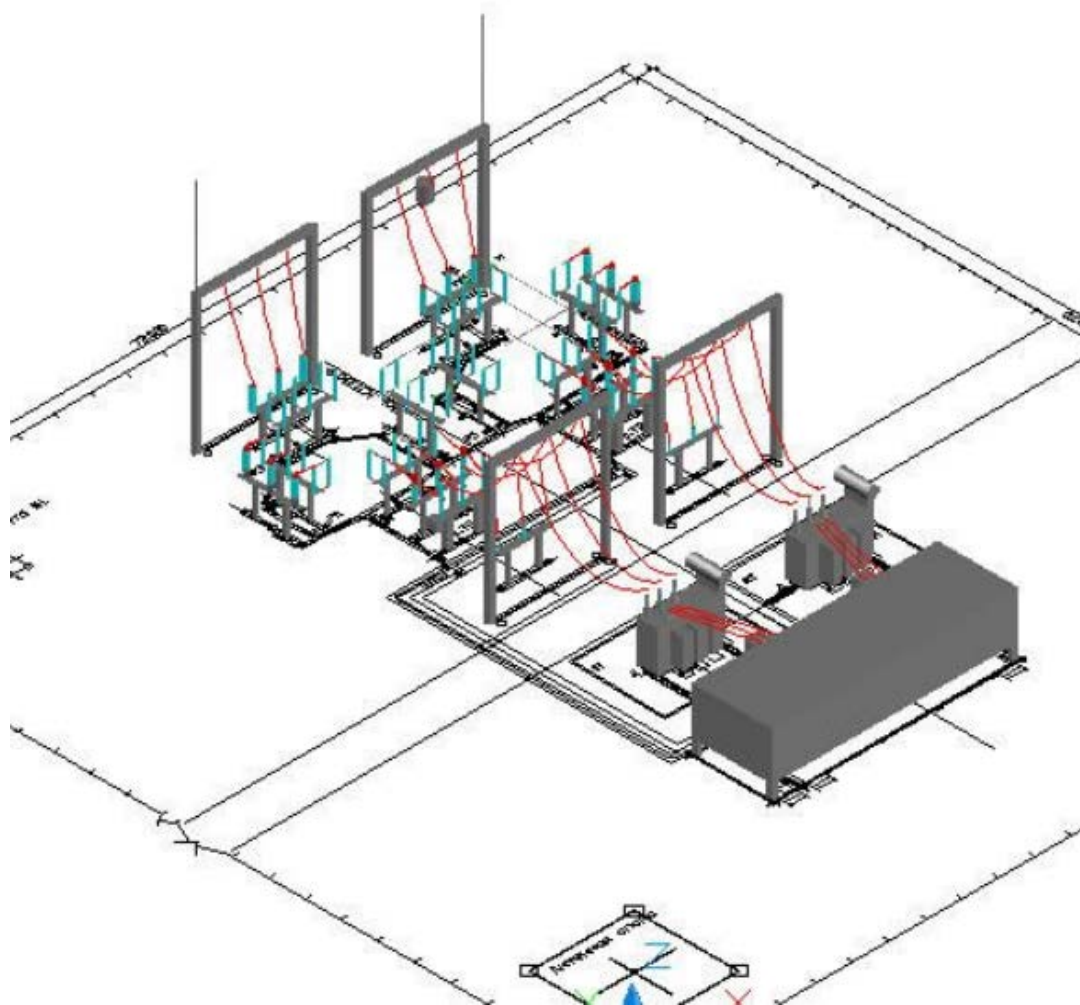


Рисунок 5.2 - Расположение оборудования на подстанции в формате 3D.

### ОПИСАНИЕ ХОДА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Согласно задания, приведённого в Приложении № 2 из каталога программы Model Studio CS ОРУ выбирается оборудование;
2. На основании типовых планов подстанций, приведённых в задании задаются размеры подстанции и оборудования;
3. Выбирается режим создания модели ОРУ (3D или 2D);
4. Задаются соответствующие зависимости (формулы), по которым будут вычисляться величина геометрических размеров;

5. Программа автоматически проводит механический расчет проводов, стрелы провеса;

6. Создается 3D модель ОРУ.

#### **ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТЫ**

В отчёте по лабораторной работе необходимо представить однолинейную схему РУ ВН и план данного РУ из задания, модель спроектированной подстанции из Model Studio CS ОРУ в 3D формате, результаты механического расчет проводов и стрел провеса.

#### **ВЫВОДЫ**

В результате выполнения лабораторной работы вырабатываются навыки по проектированию ОРУ подстанции в системе автоматизированного проектирования Model Studio CS ОРУ.

#### **ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.**

1. Что такое САПР?
2. Модели какого формата можно разрабатывать в Model Studio CS ОРУ?
3. Достоинства проектирования ОРУ в Model Studio CS ОРУ?
4. Какие элементы подстанции позволяет моделировать Model Studio CS ОРУ?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение современных ПВК является необходимой базой для подготовки специалиста, отвечающего современным требованиям эксплуатации и проектных компаний в сфере электроэнергетики. Знания указанных ПВК дают возможность выпускнику сразу после окончания обучения приступать к выполнению практических задач по проектированию электроэнергетических систем и проверке таковых решений в эксплуатирующих организациях.

В ходе выполнения лабораторных работ студенты, изучающие дисциплину «Промышленные программно-вычислительные комплексы в электроэнергетике», приобретут практические навыки моделирования электроэнергетических систем для расчётов установившихся режимов и токов короткого замыкания, научатся выполнять расчёты установившихся и переходных режимов с помощью современных ПВК, и создавать 3D модели подстанций.

Изучение принципов моделирования ЭЭС в рассмотренных ПВК даёт выпускникам серьёзную базу для изучения других прикладных программ по расчёту режимов электрических сетей и по автоматизированному проектированию объектов электро- и теплоэнергетике.

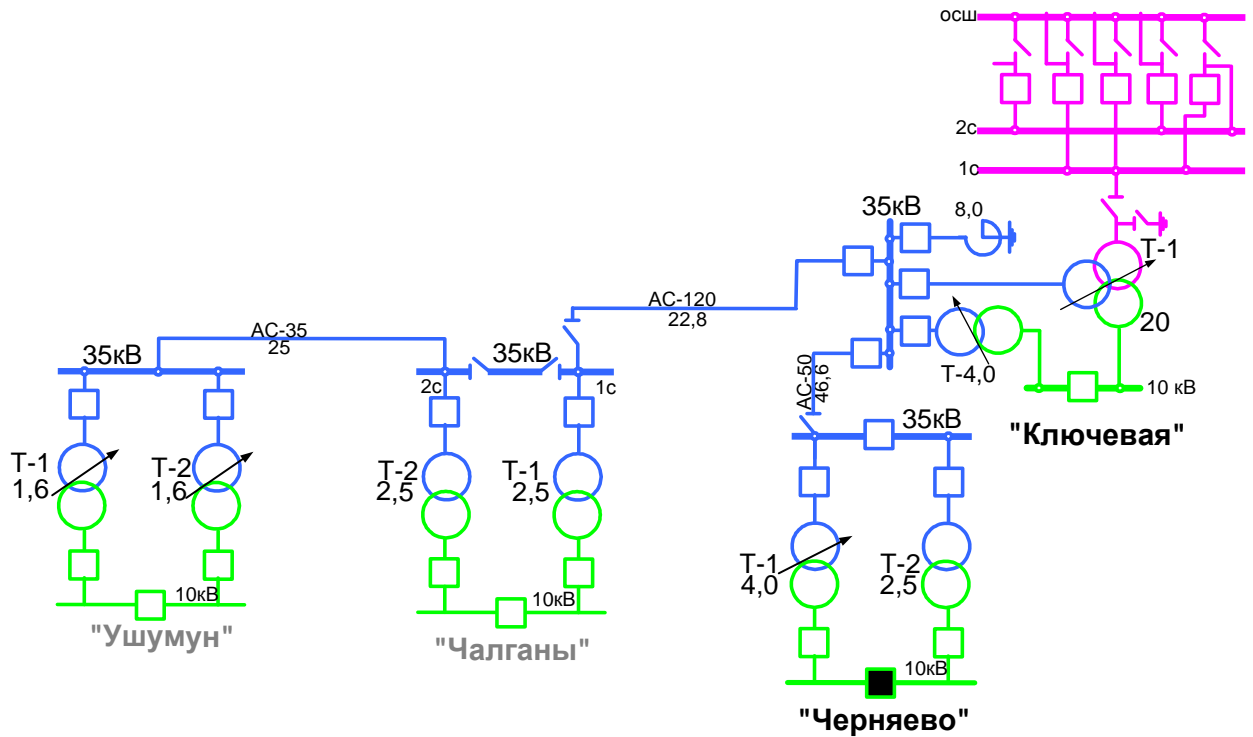
## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блок В.М. Электрические сети и системы: Учебное пособие для электроэнергетических специальностей вузов – М.: Высшая школа 1986. - 430 стр.
2. Воробьев. С П. Проектирование ПС и ОРУ в Model Studio CS Открытые распределительные устройства // Эффективные технологии проектирования систем электроснабжения и автоматики. Решения группы компаний CSoft. сб. статей ЗАО «СиСофт Иваново», ЗАО «СиСофт». - Москва, 2012. - 240 с.
3. ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
4. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288с.
5. Идельчик В.И. Электрические системы и сети Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 592 с.
6. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 680с.
7. Неуймин В. Г., Машалов Е. В., Александров А.С., Багрянцев А. А. Программный комплекс «RastrWin3». Руководство пользователя. 15.04.2013
8. Поспелов Г. Е., Федин В. Т. Электрические системы и сети. Проектирование: Учеб. пособие для вузов.— 2-е изд., испр. и доп.— Мн.: Выш. шк., 1988.—308 с.: ил.
9. Правила устройств электроустановок. 7 изд. / Министерство энергетики Российской Федерации.
10. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования РД 153-34.0-20.527-98
11. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения Учеб для вузов. - Изд. дом МЭИ, 2007.- 488 с.: ил.
12. СО 153-34.20.576-2003 Методические указания по устойчивости энергосистем (взамен РД 34.20.576-94);
13. СО 153-34.20.118-2003 «Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем».
14. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ.

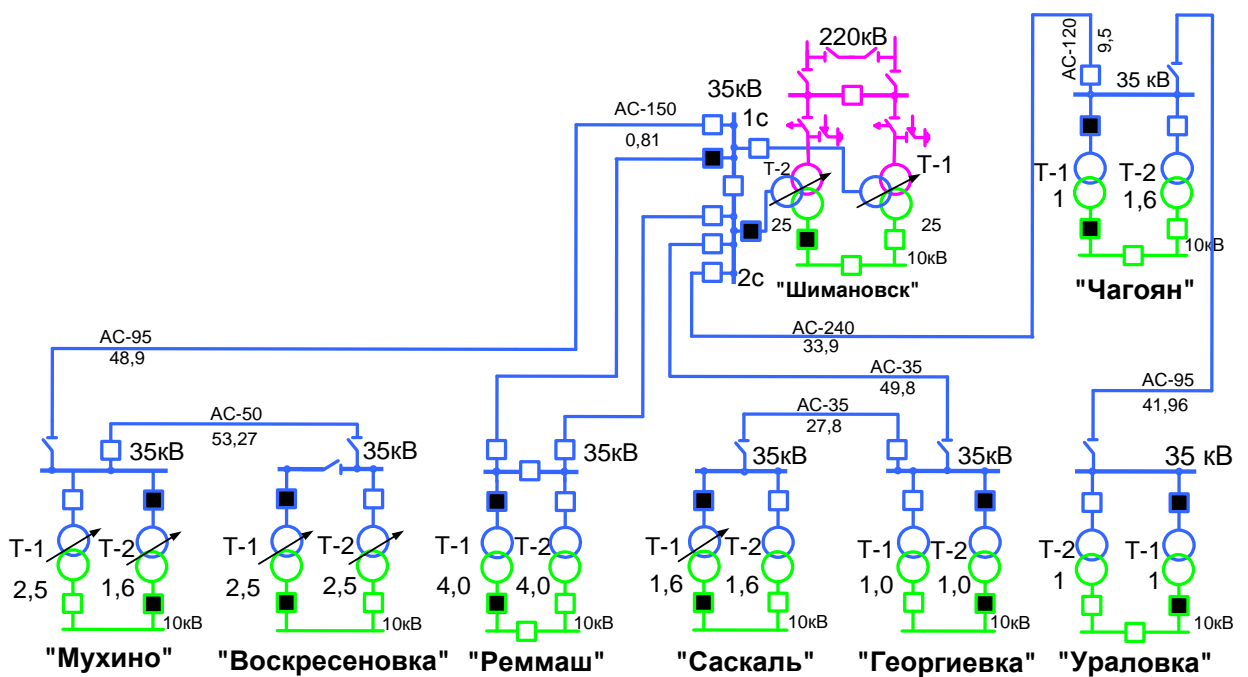
15. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.- М.: Энергия, 1979.
16. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях: Учеб. пособие для электроэнерг. спец. /В. В. Ежков, Г. К. Зарудский, Э. Н. Зуев и др.; Под. ред. В. А. Строева. — М.: Высш. шк., 1999 — 352 с.
17. Электротехнический справочник: В 3 т. Т.3. Кн.1. Производство и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ: И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880с.
18. Model Studio CS Открытые распределительные устройства. Руководство пользователя.
19. RastrWin3. Документация пользователя (коммутационные схемы).
20. RastrWin3. Помощь в ПК RastrKZ.
21. Официальные сайты группы компаний CSoft. <http://www.csoft.ru>, <http://www.mscad.ru>.

Однолинейные схемы электрических сетей для расчётов электрических режимов

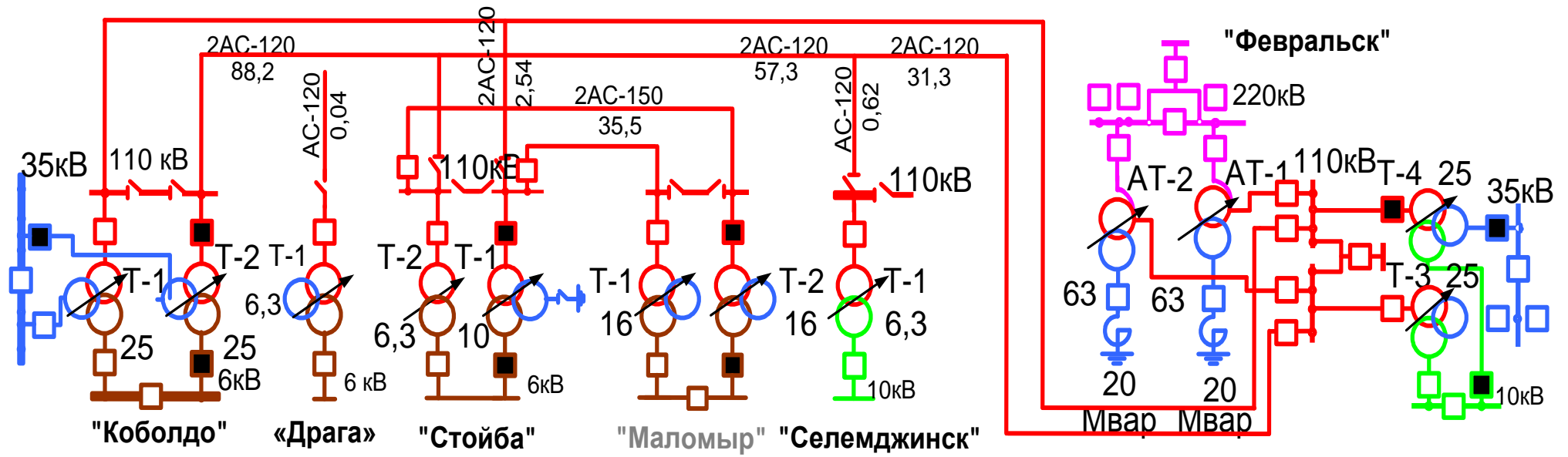
Вариант № 1



Вариант № 2

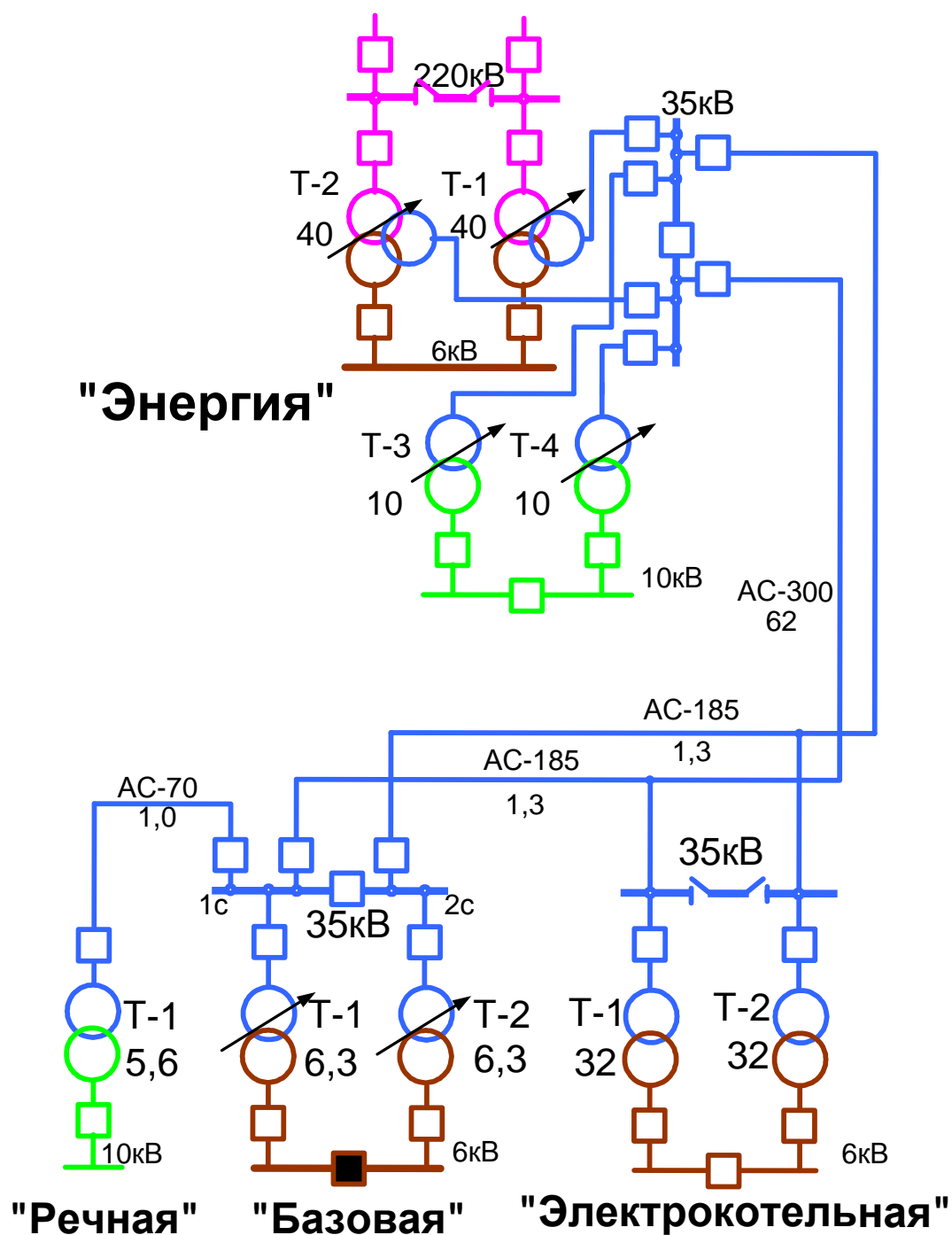


Вариант № 3

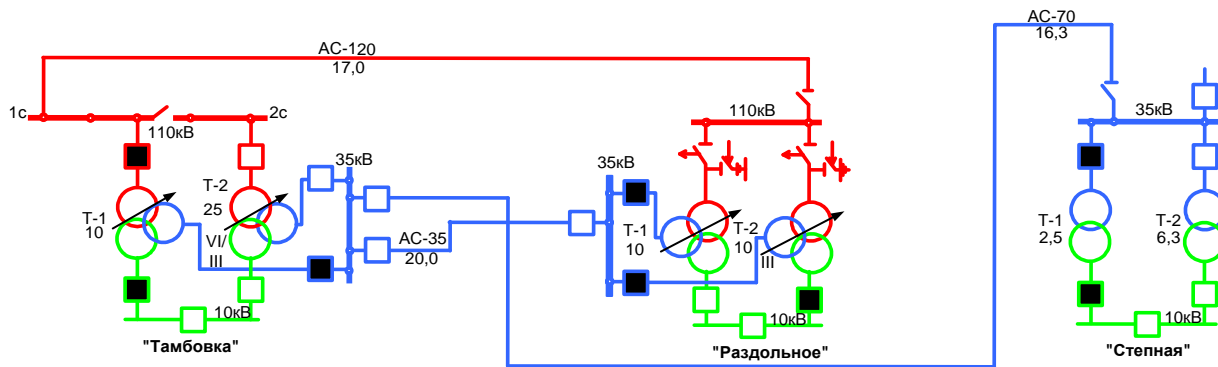




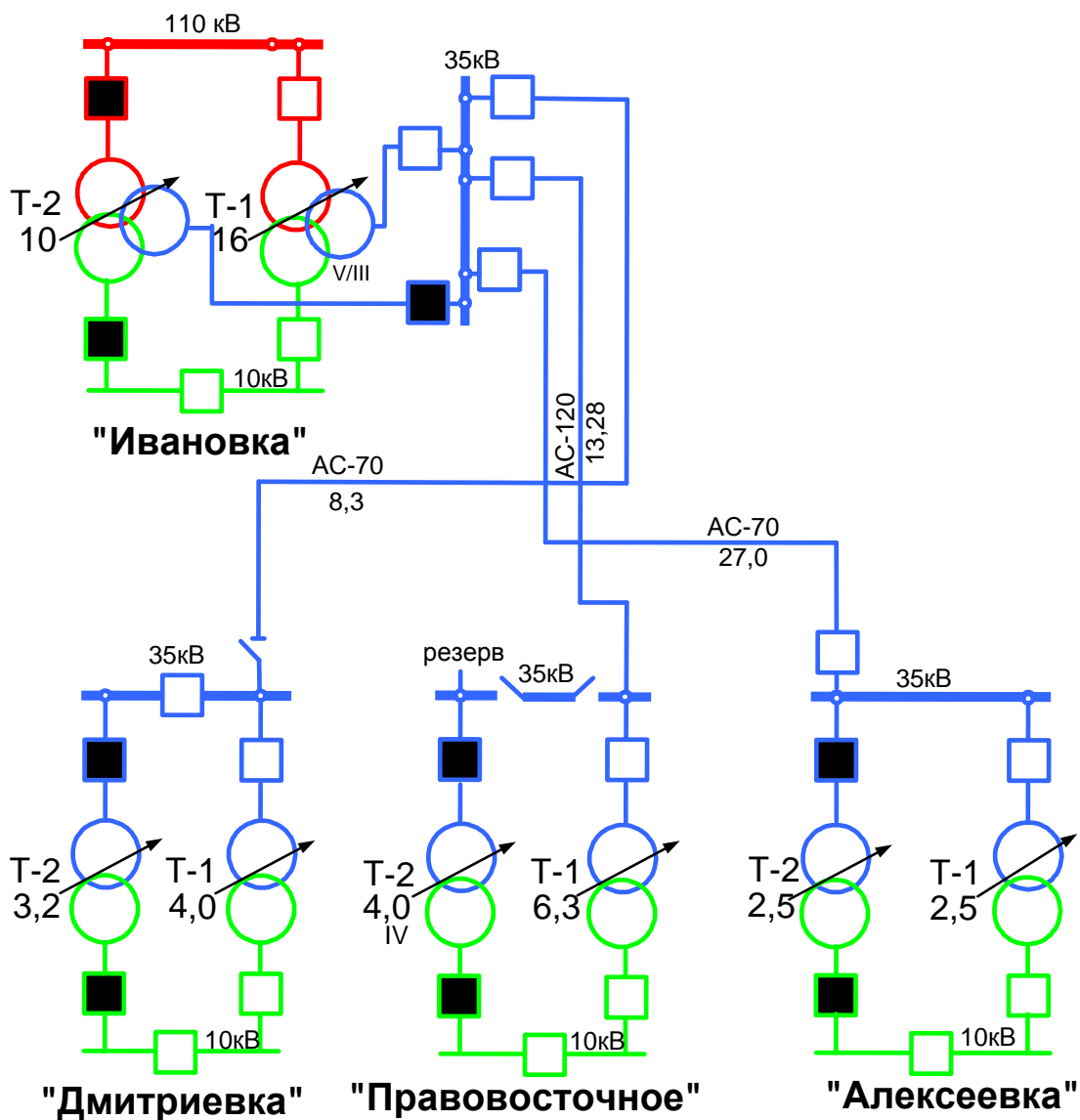
Вариант № 4



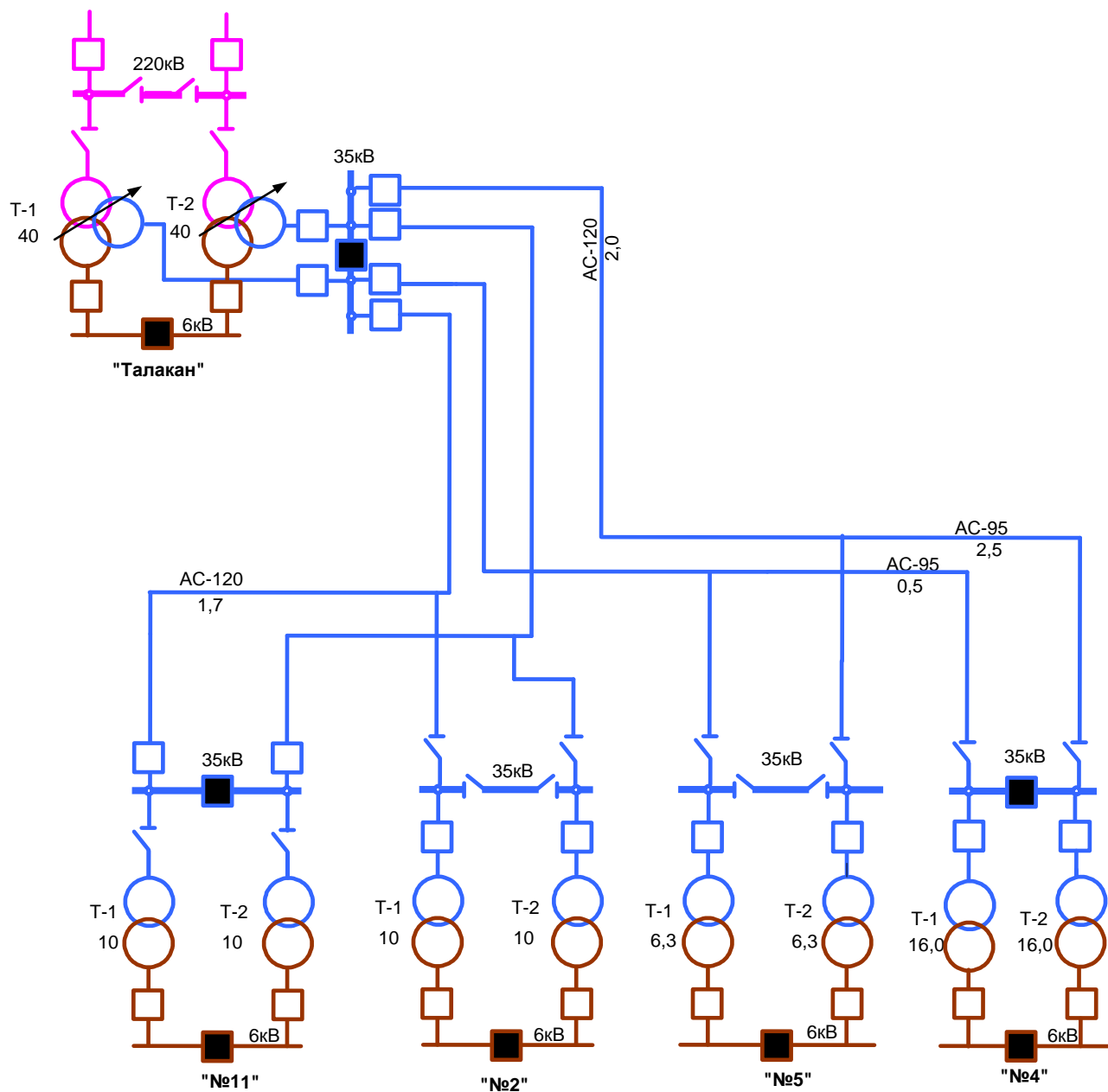
## Вариант № 5



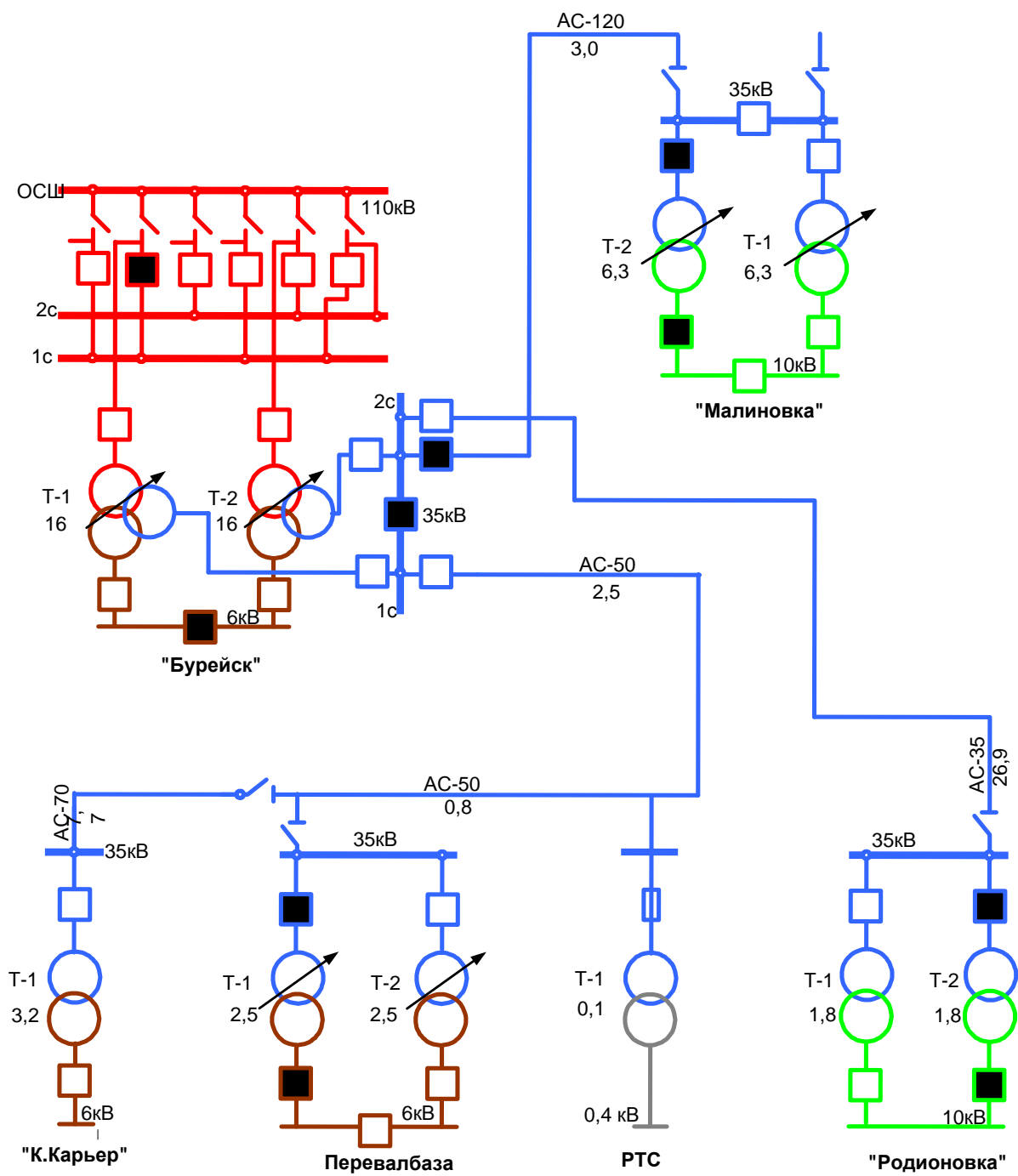
## Вариант № 6



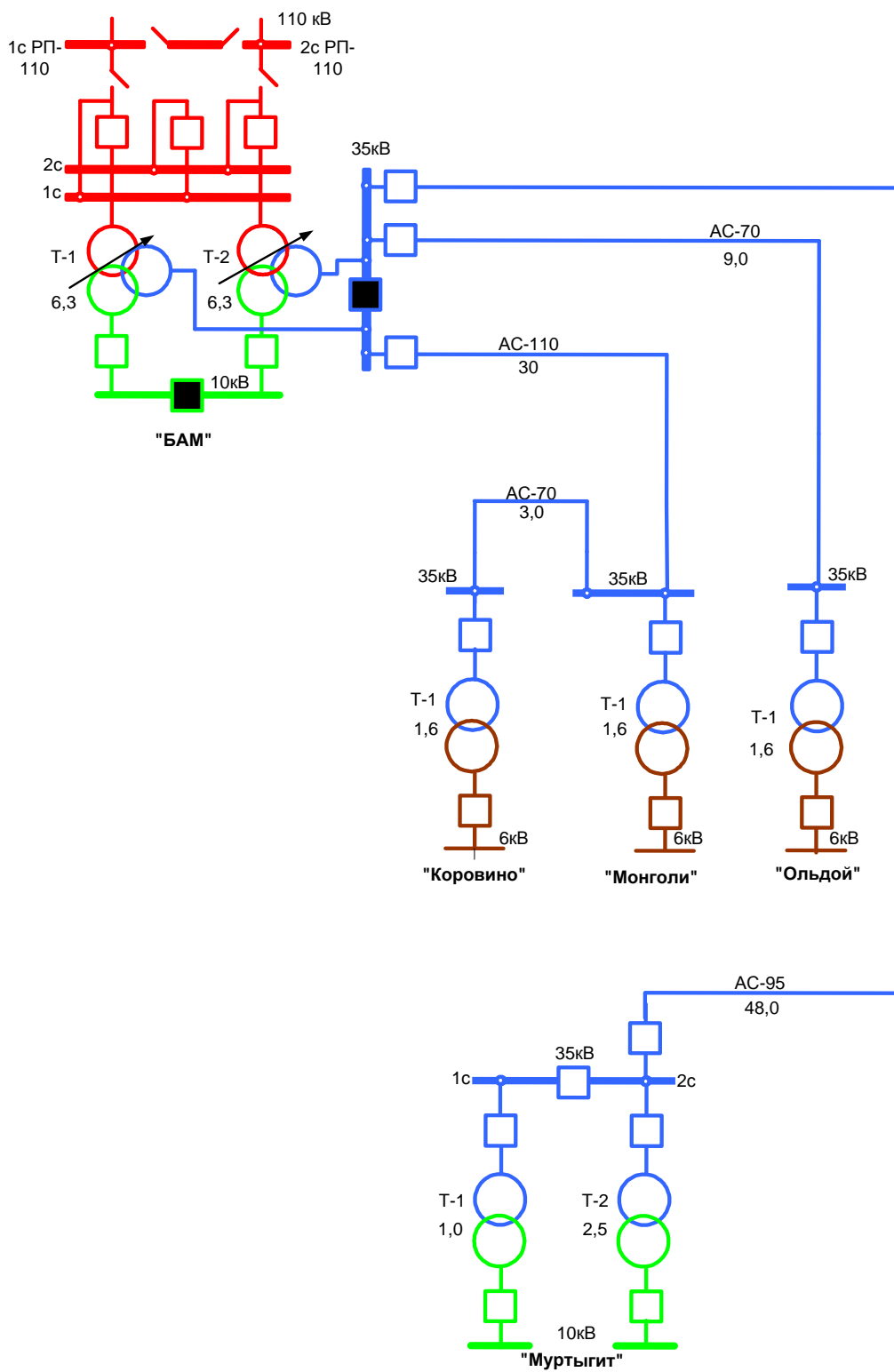
Вариант № 7



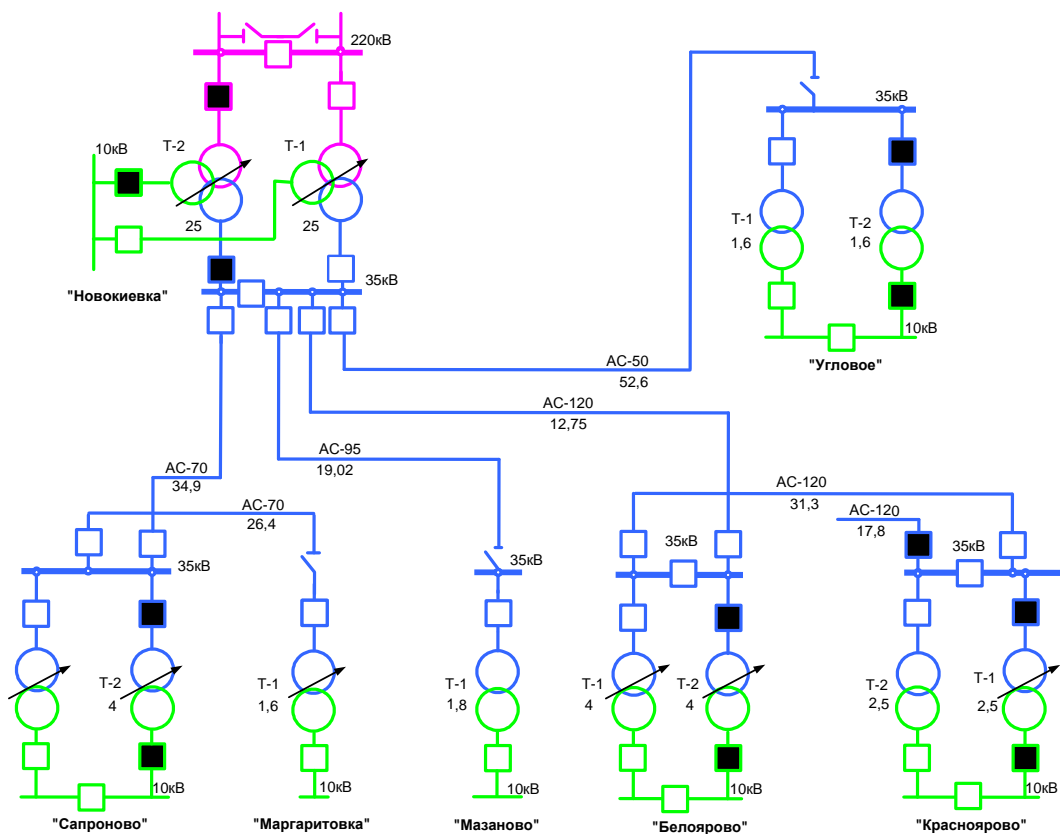
# Вариант № 8



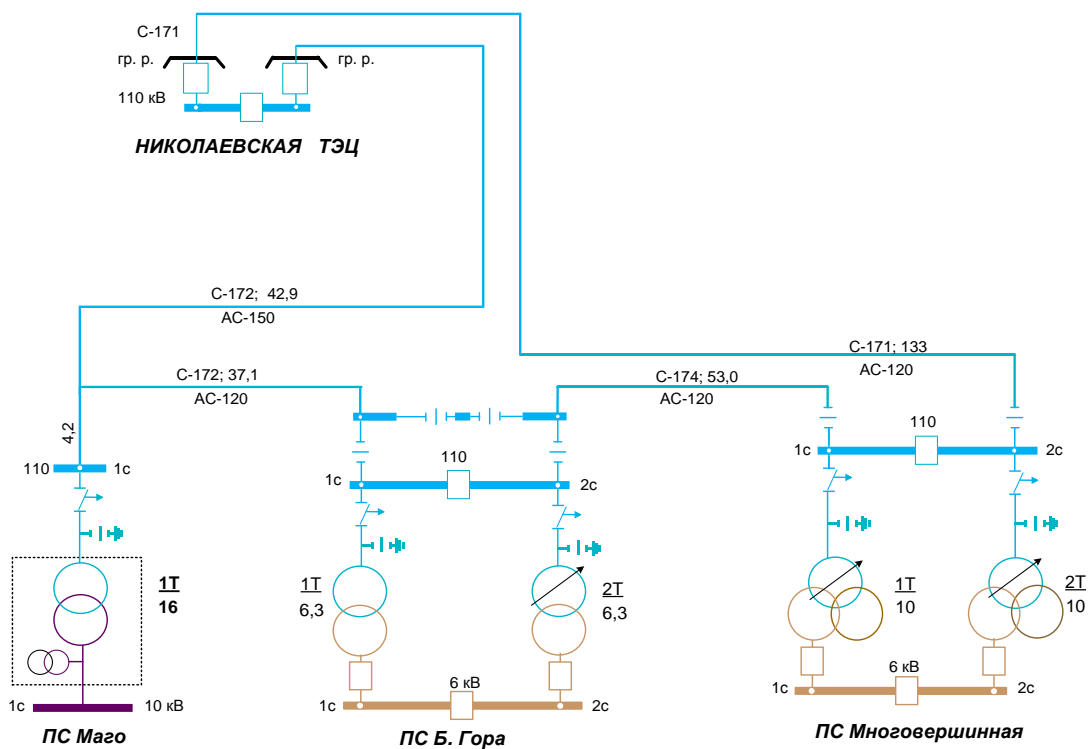
# Вариант № 9



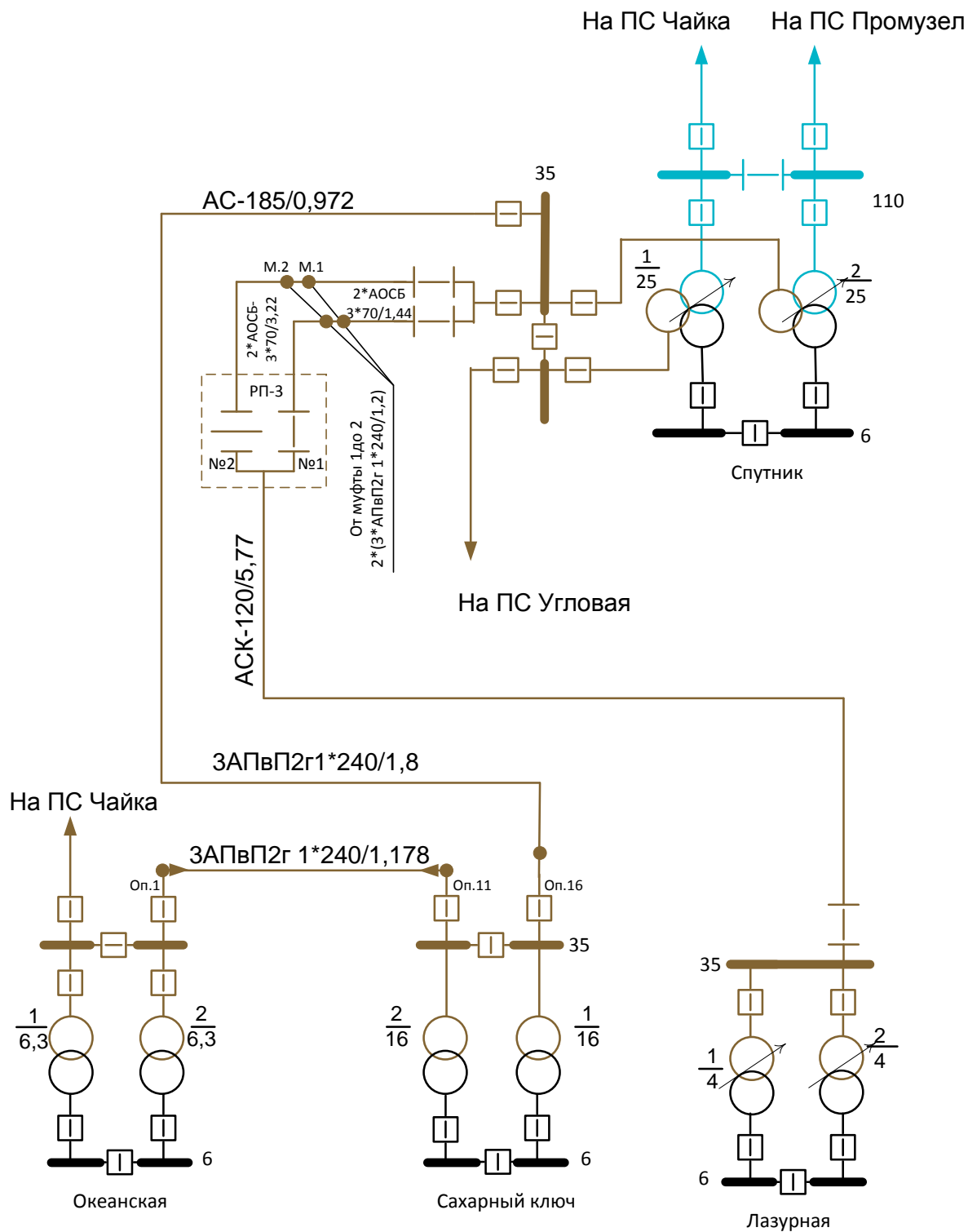
## Вариант № 10



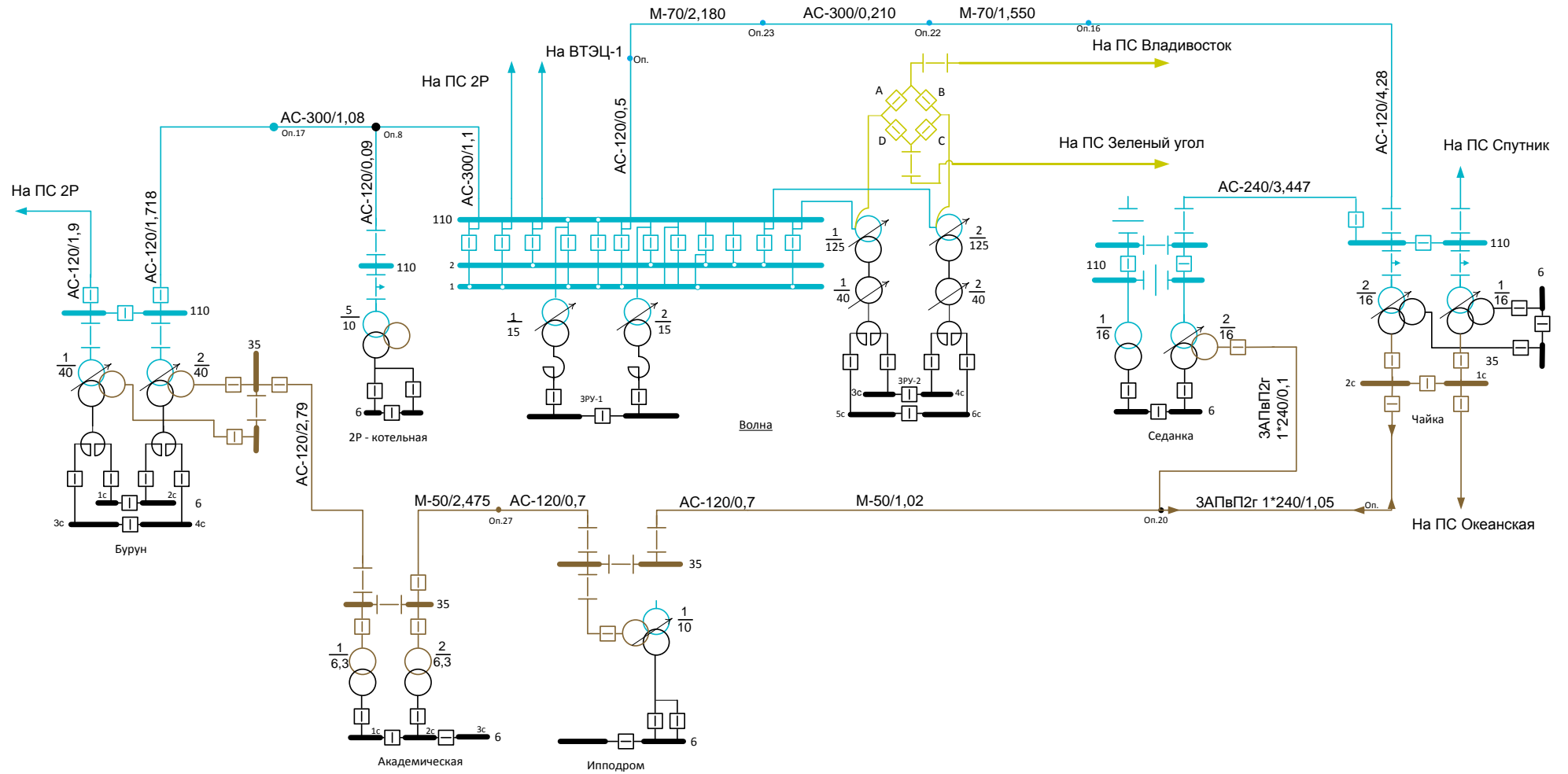
## Вариант № 11



# Вариант № 12

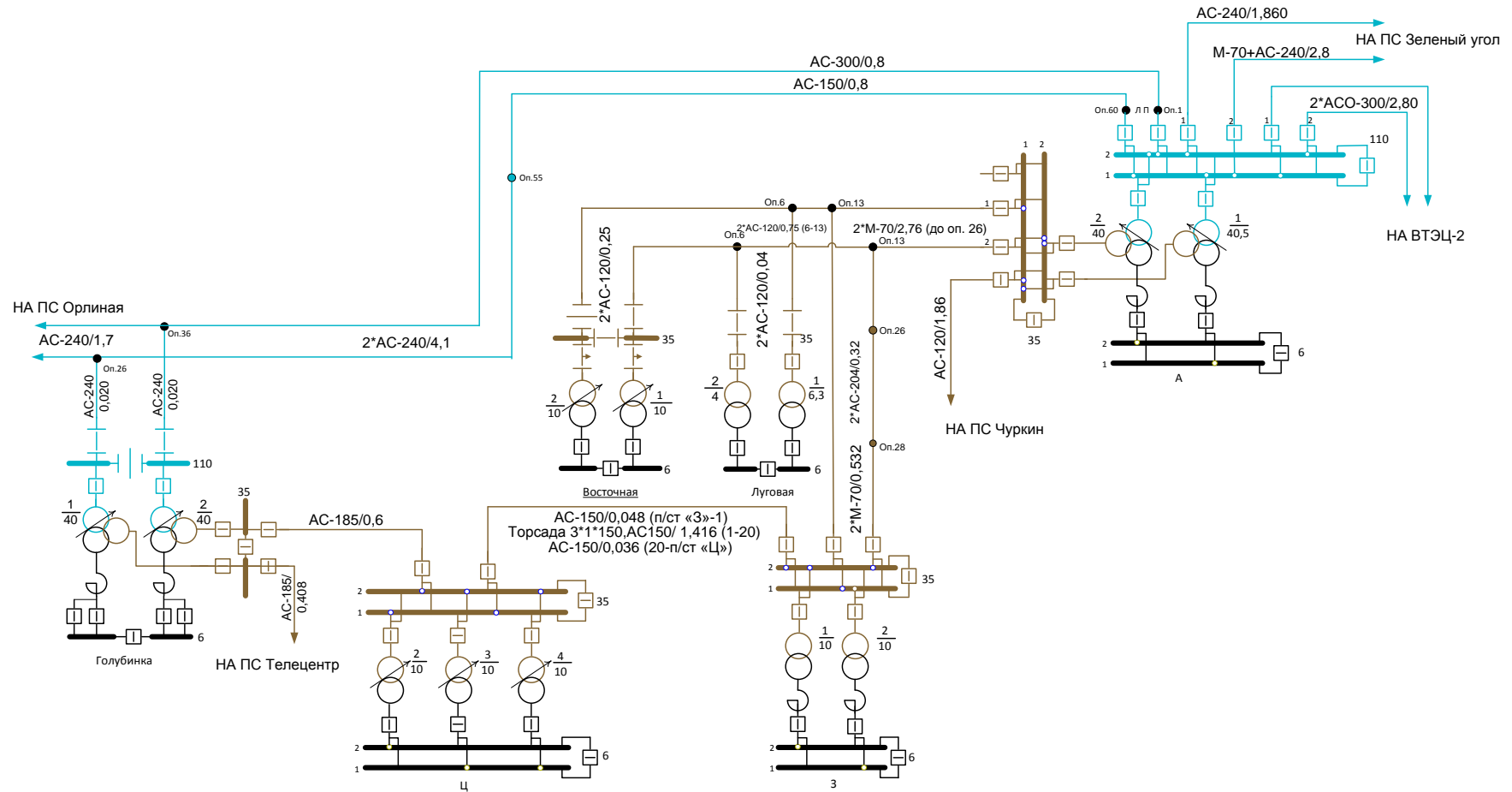


# Вариант № 13

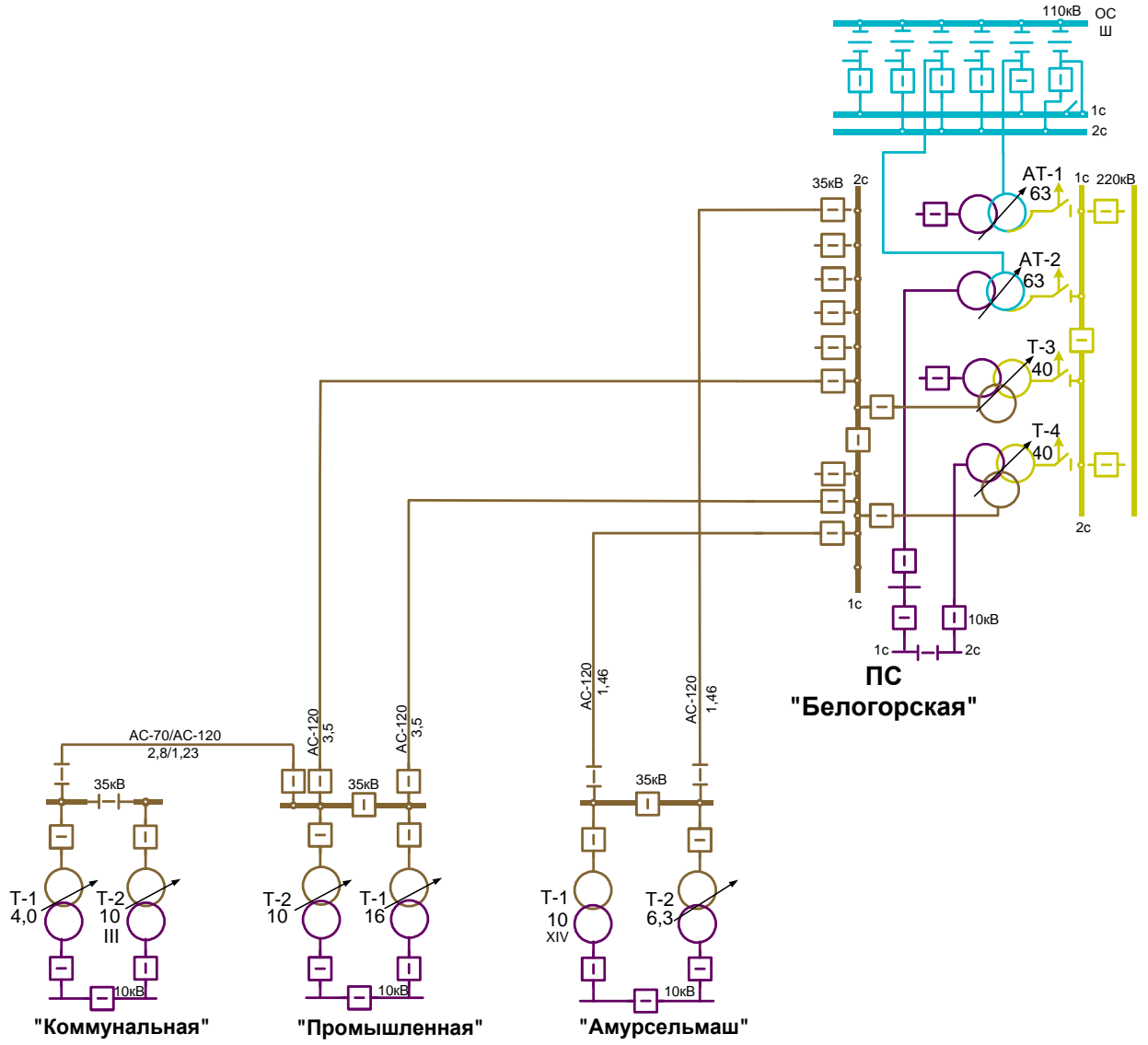




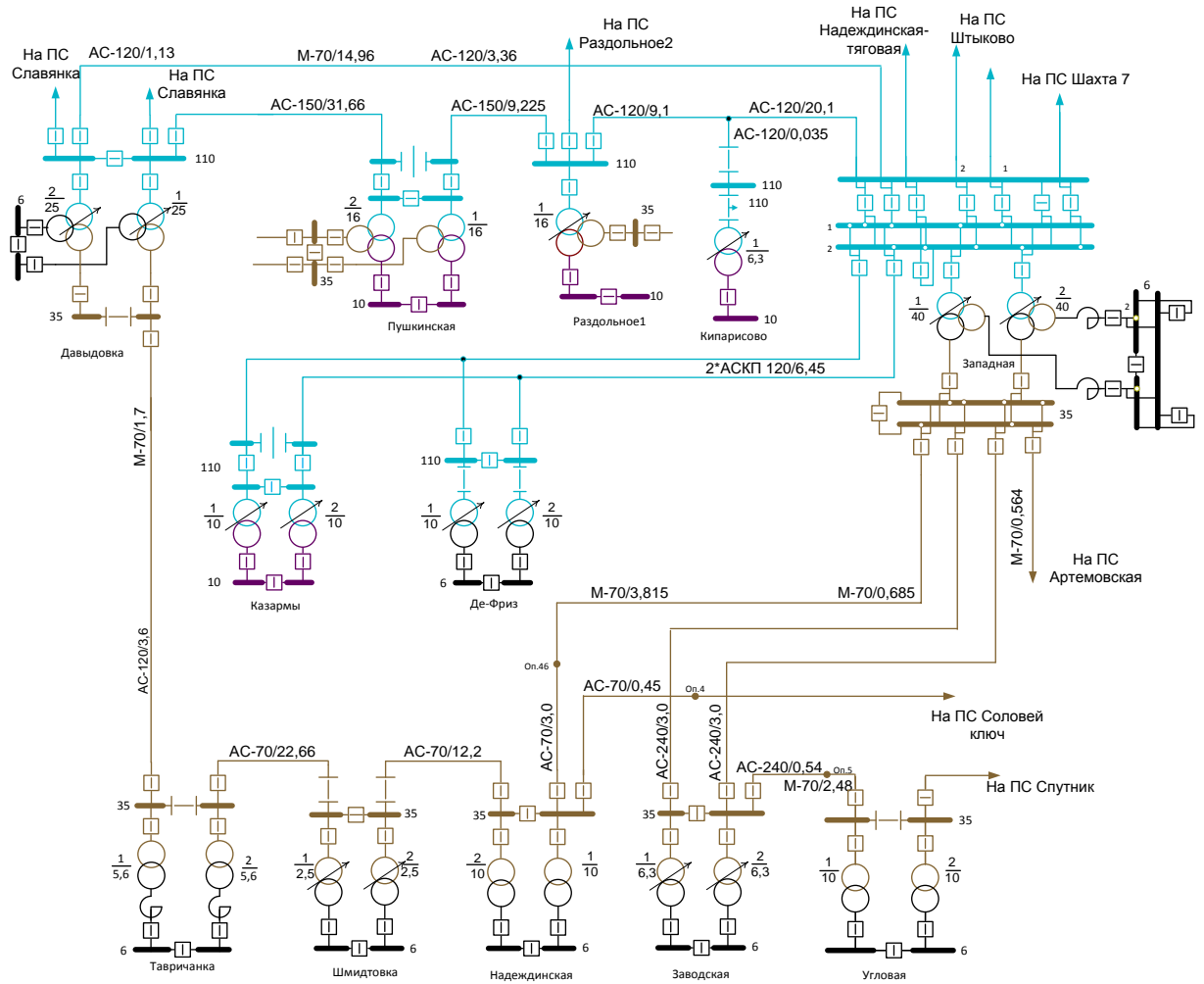
# Вариант № 14



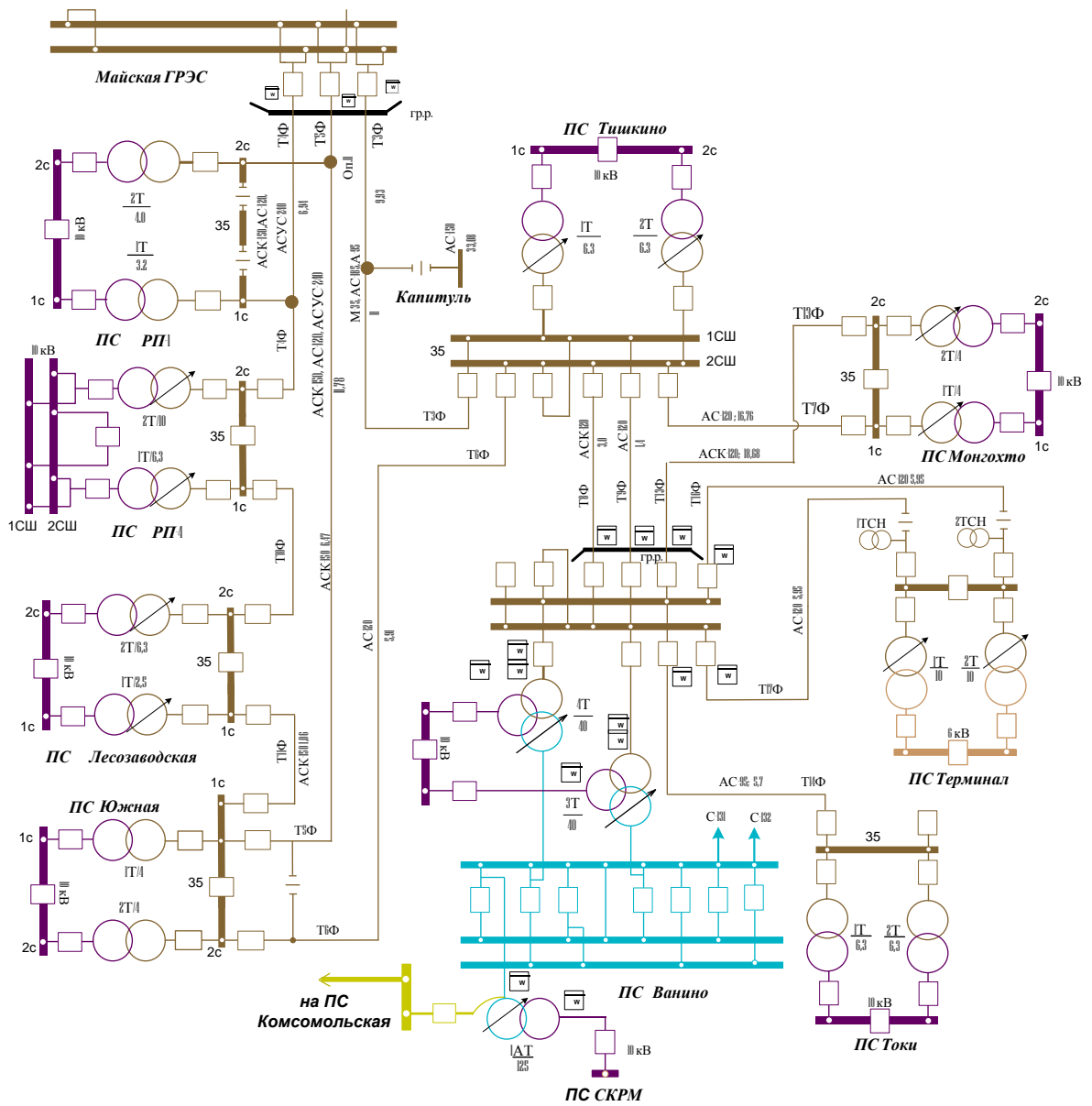
# Вариант № 15



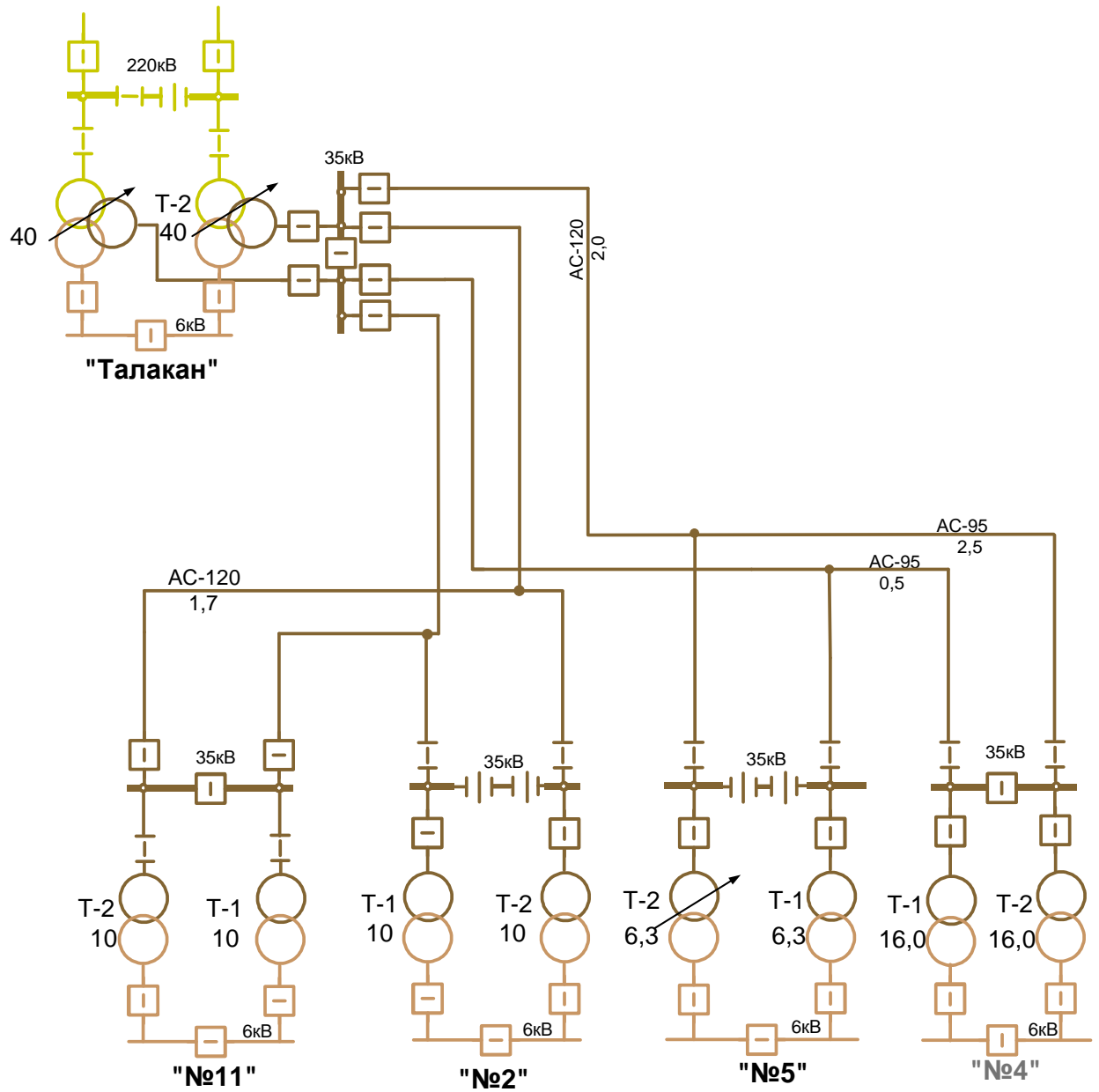
# Вариант № 16



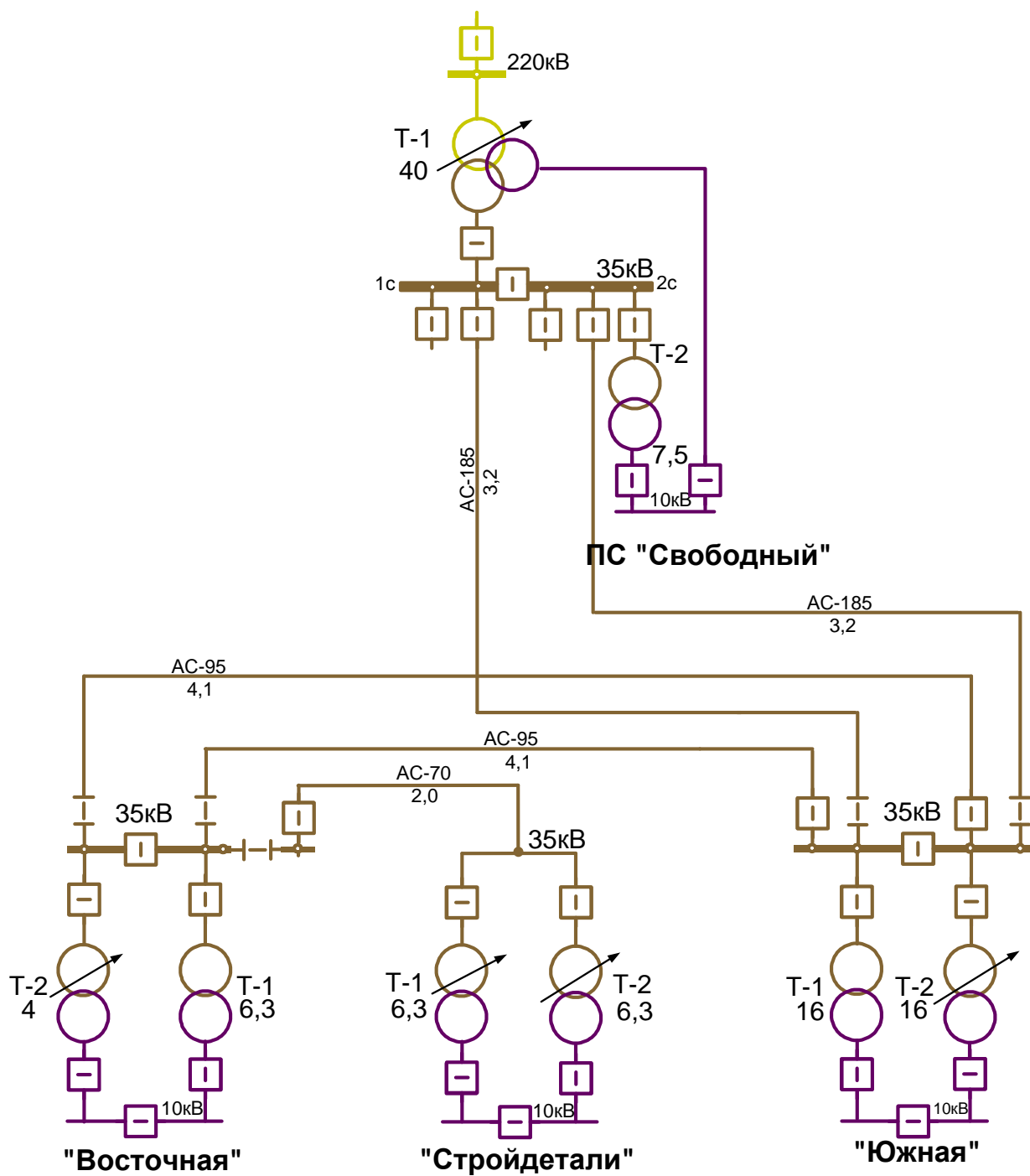
# Вариант № 17



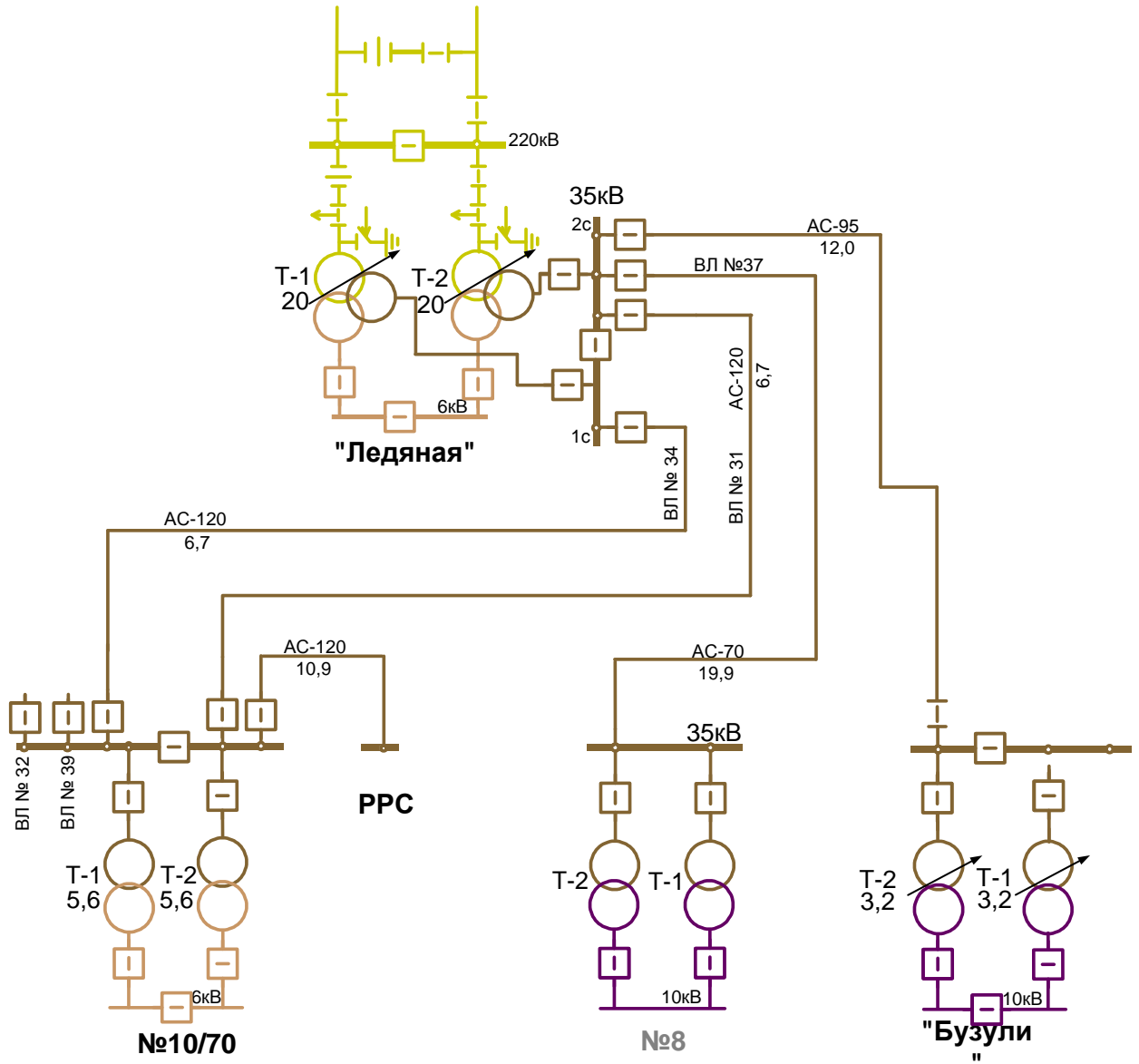
Вариант № 18



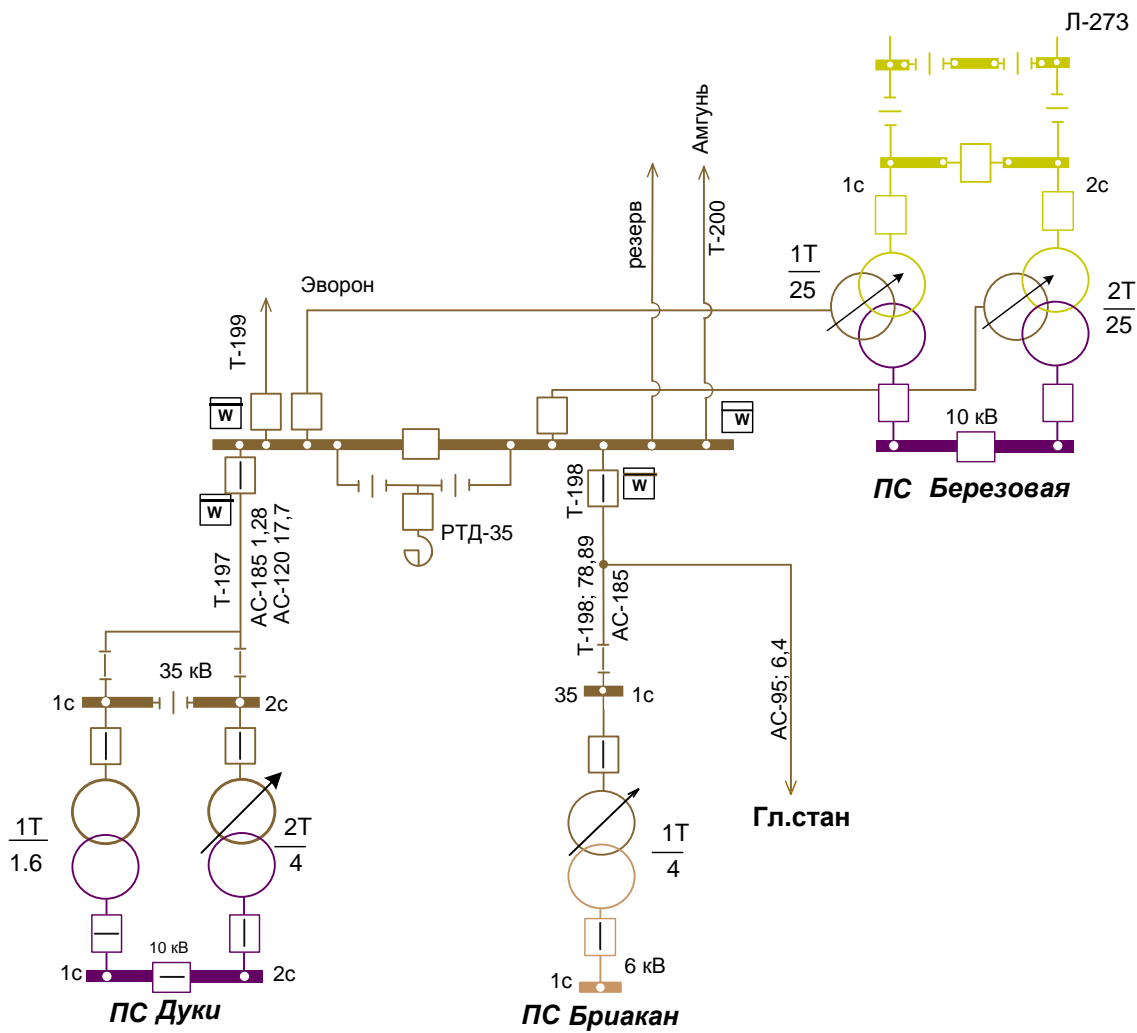
Вариант № 19



Вариант № 20

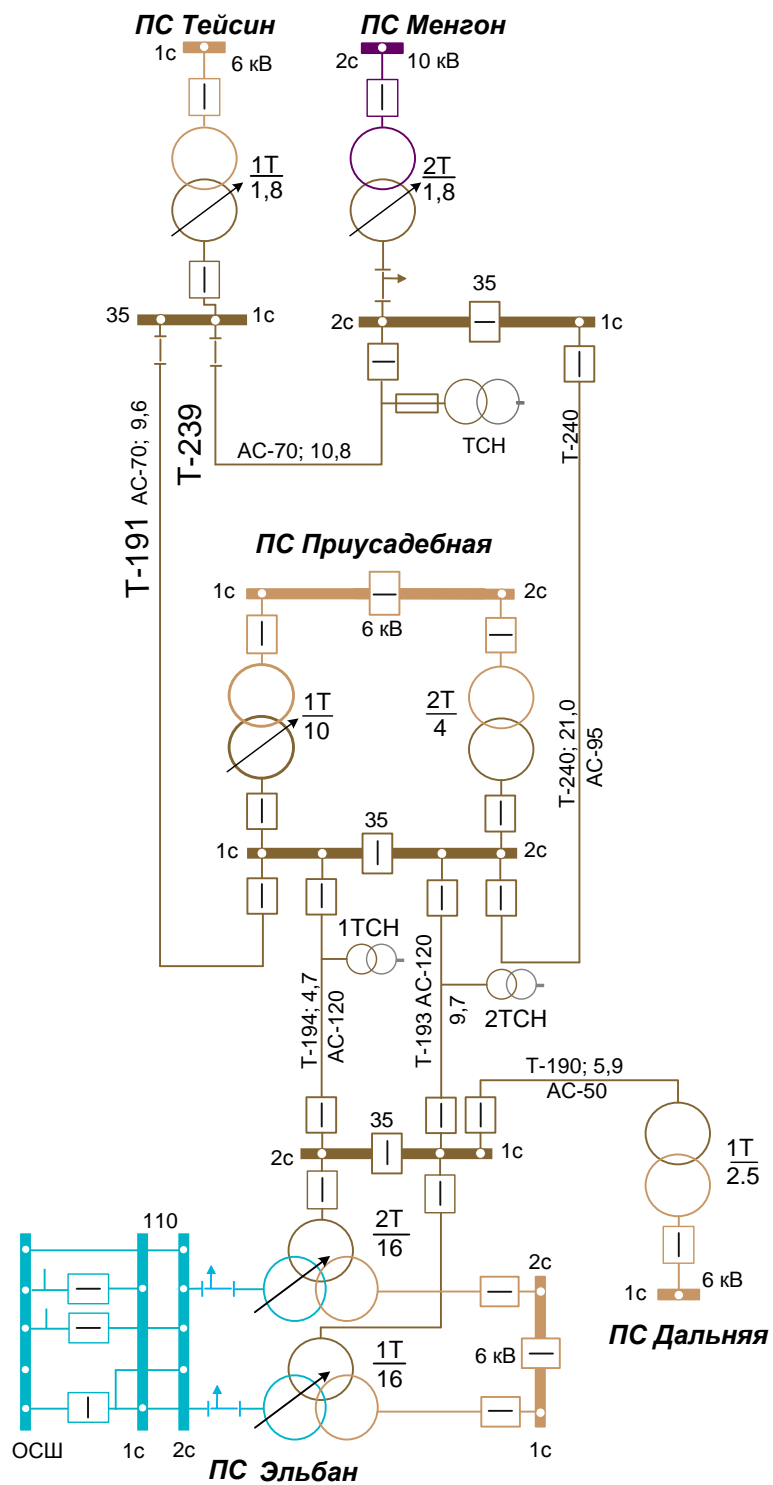


# Вариант № 21

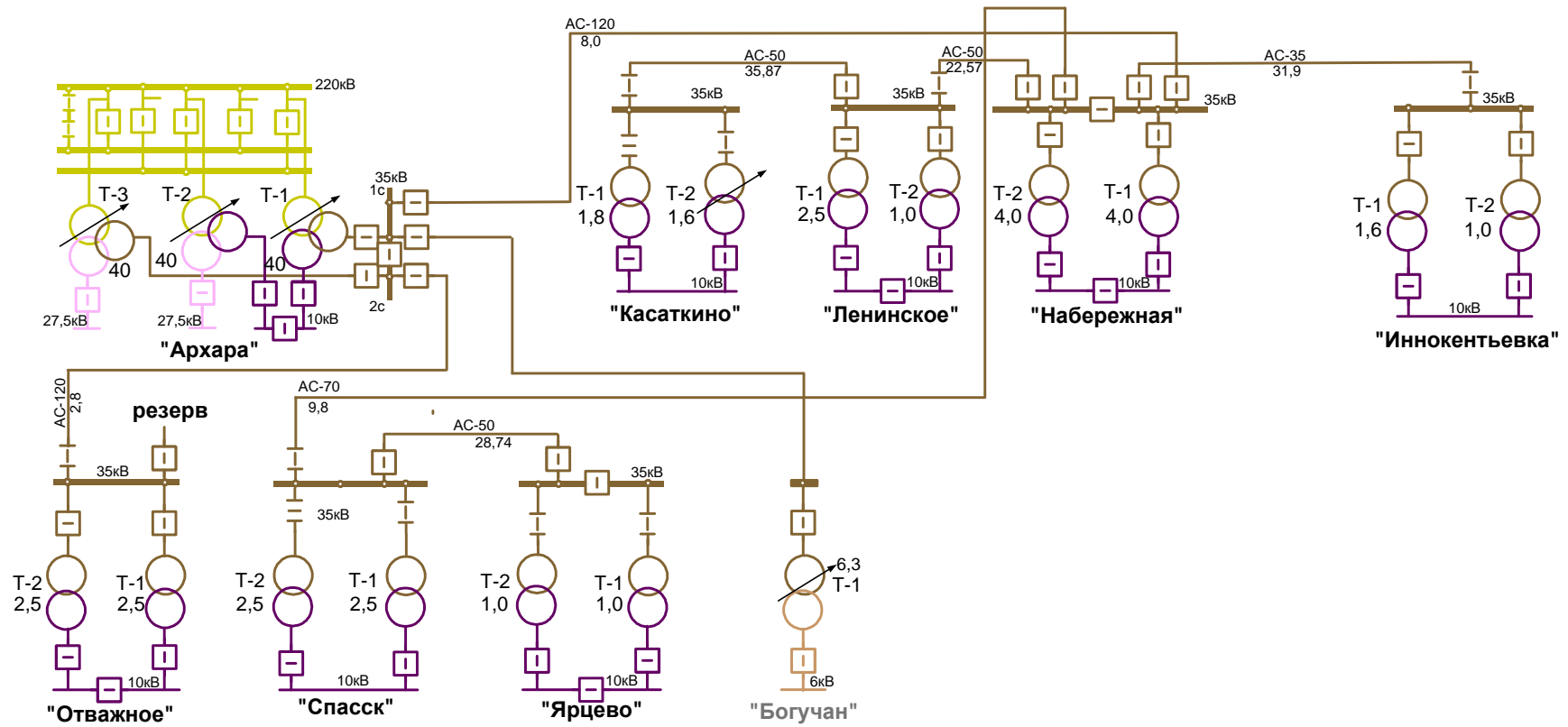




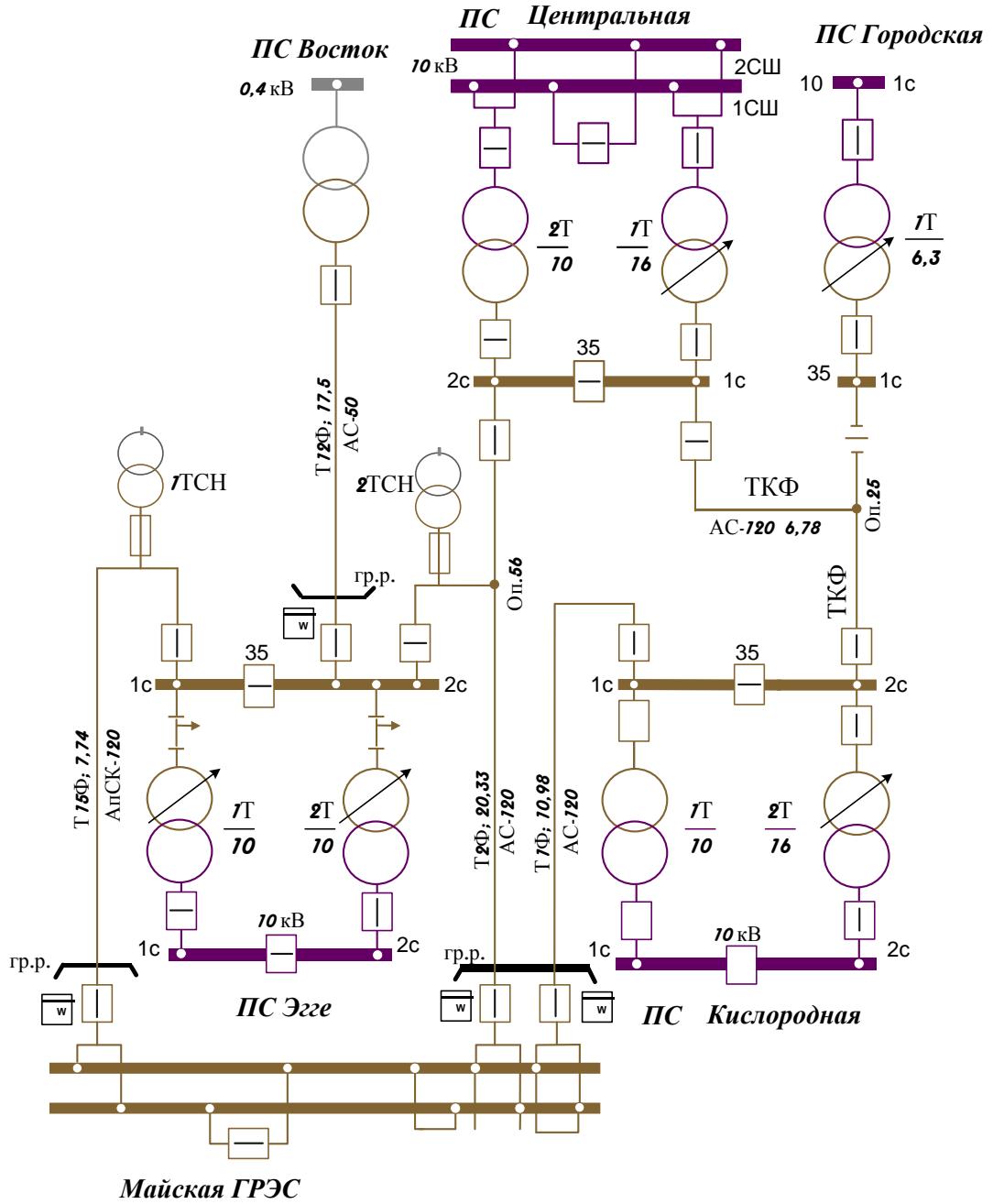
# Вариант № 22



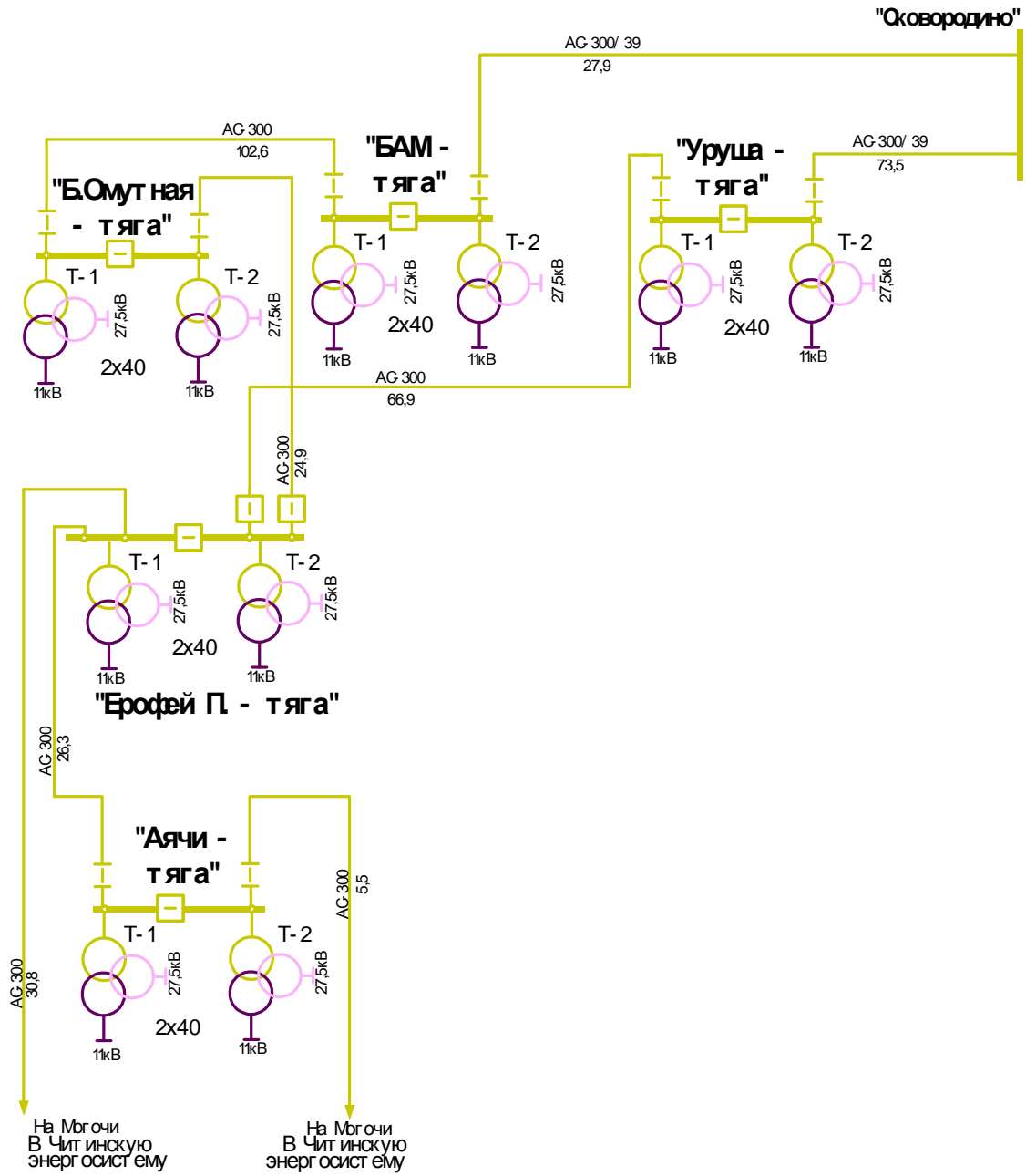
# Вариант № 23



Вариант № 24



# Вариант № 25



Вспомогательные материалы для выполнения лабораторной работы  
по созданию 3D моделей ОРУ подстанций.

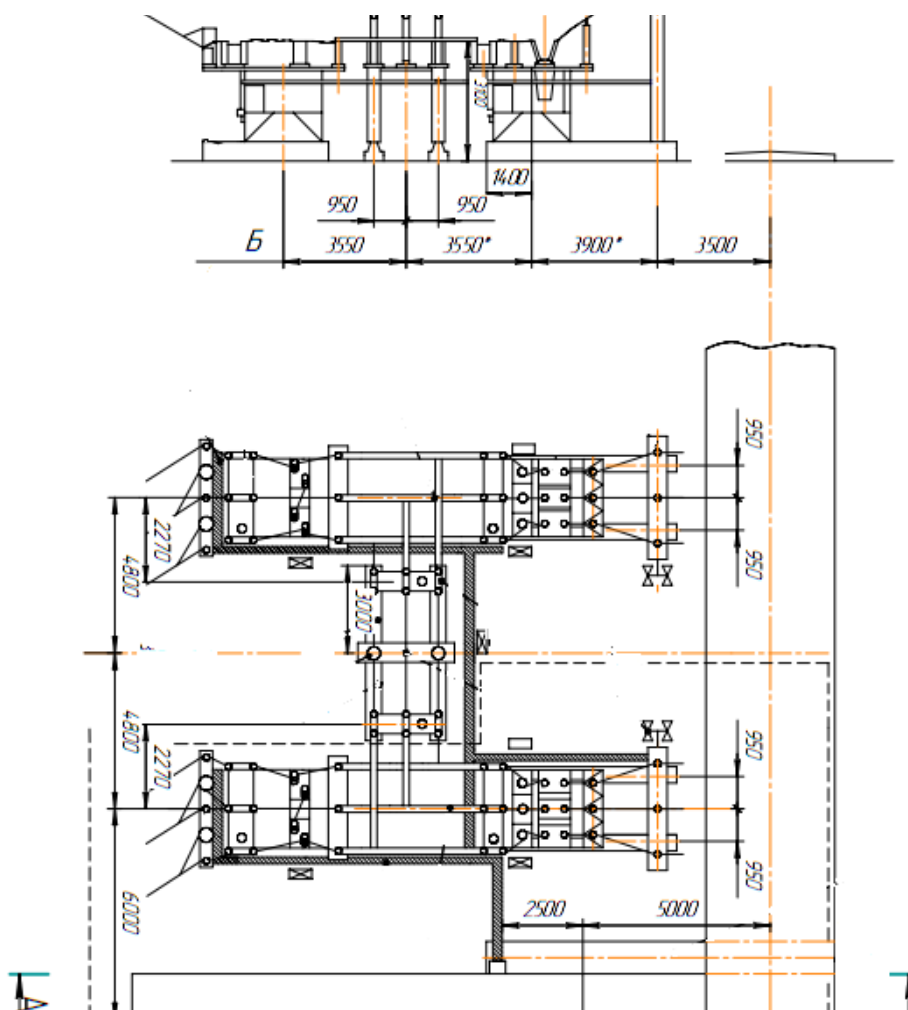


Рисунок П2.1 - Пример плана ОРУ 35 кВ по схеме 4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии».

**A-A**

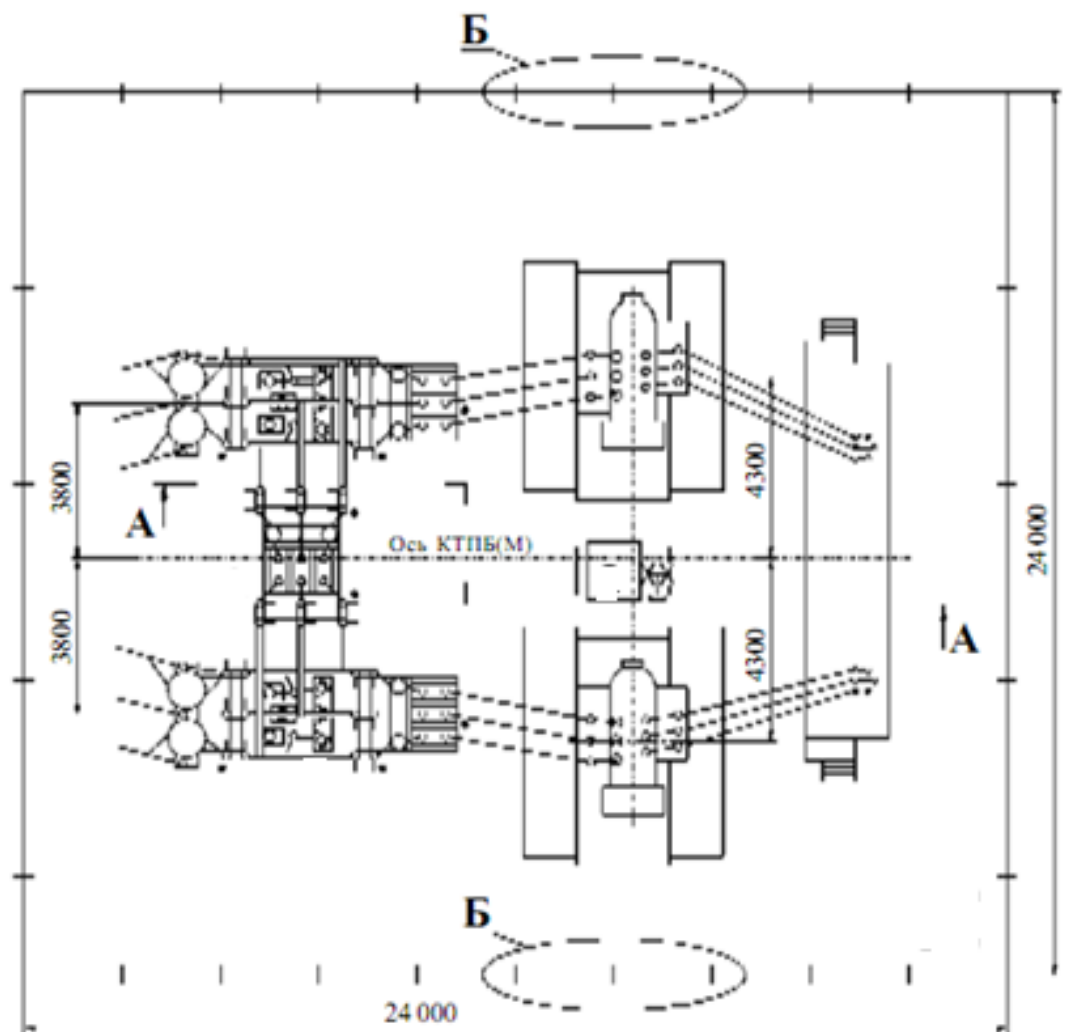
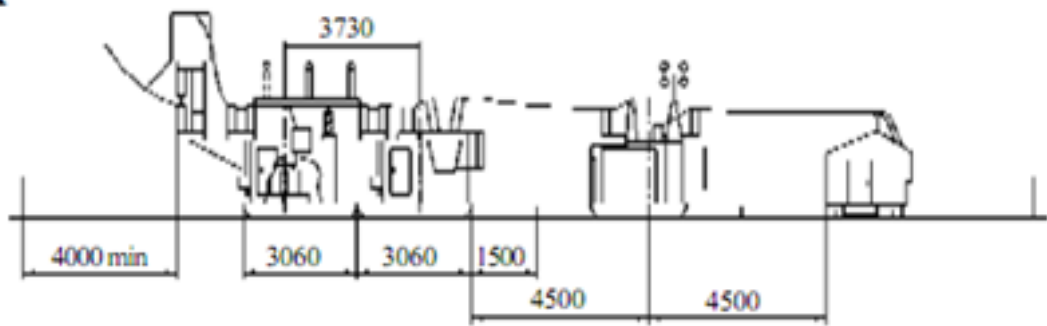


Рисунок П2.2 - Схема ОРУ35 кВ «Мостик с выключателями в цепях трансформаторов».

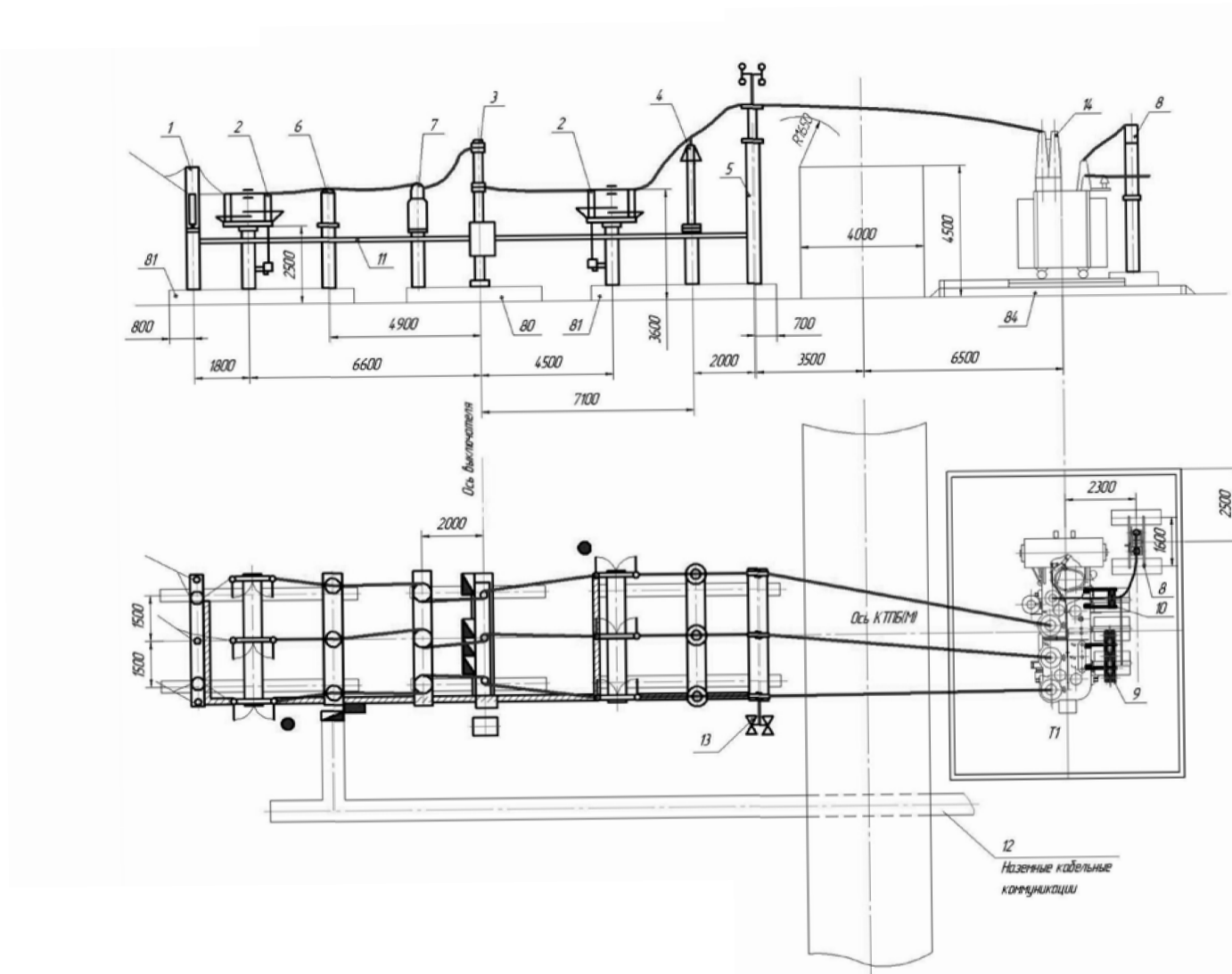


Рисунок П2.3 - Пример разрез и компоновки ОРУ 110 кВ по схеме 110-3Н.

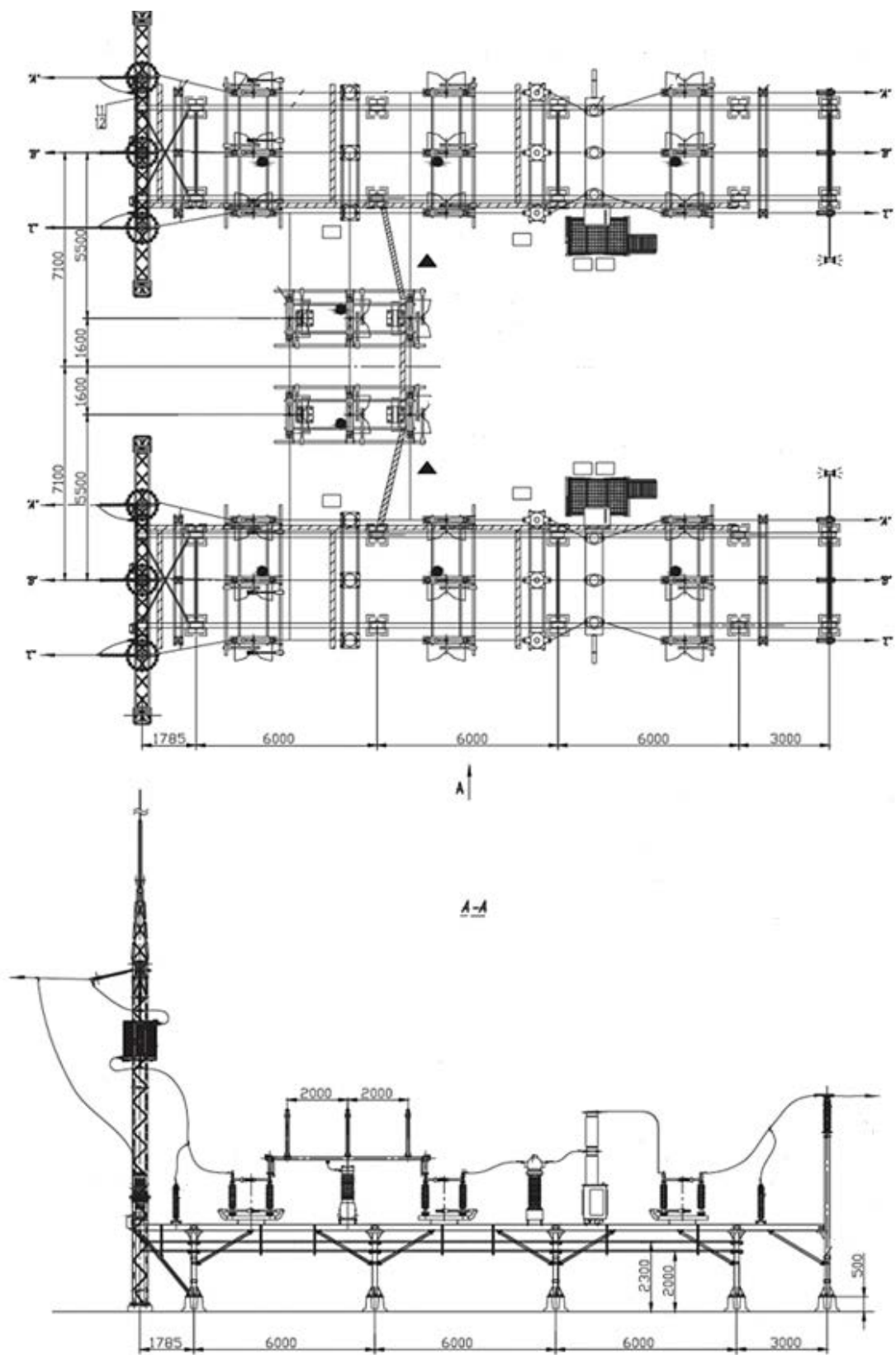


Рисунок П2.4 - Пример плана ОРУ 110 кВ по схеме 4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии».



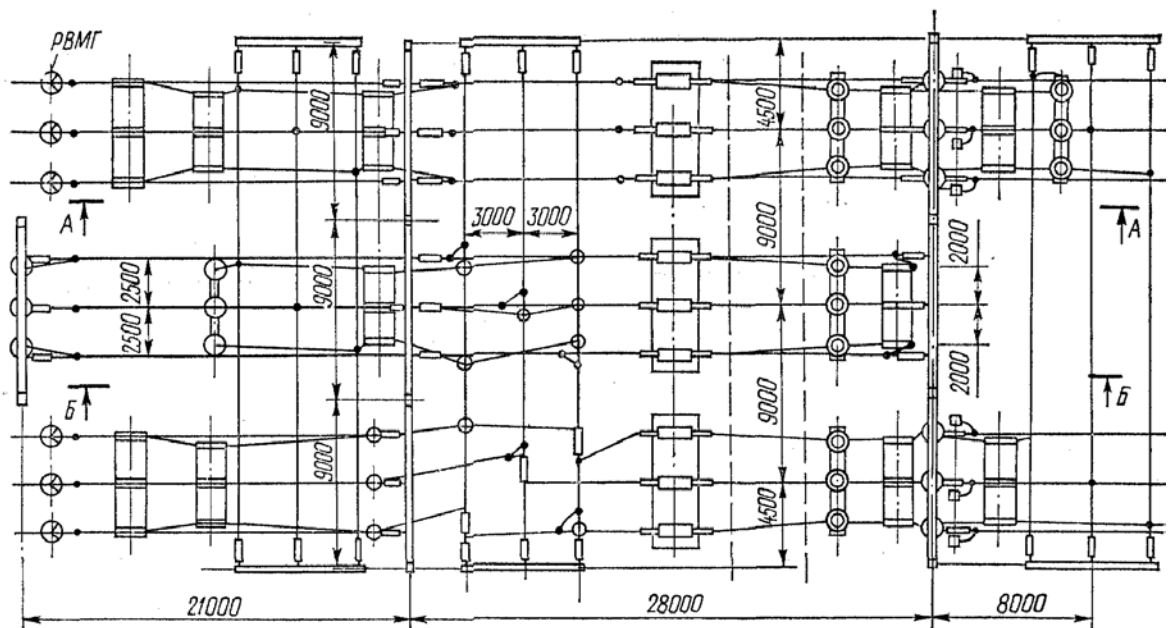
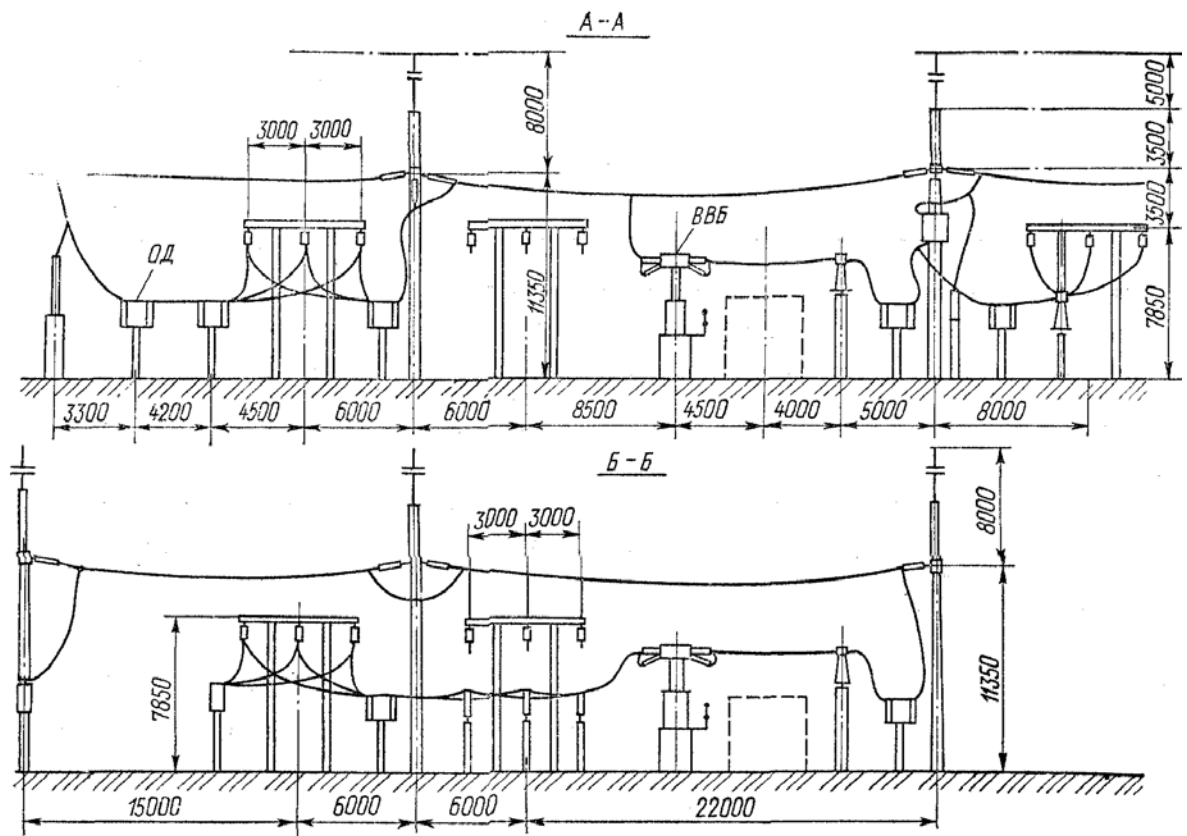


Рисунок П2.5 - Пример плана ОРУ110 кВ по схеме 5Н «Мостик с выключателями в цепях линий».

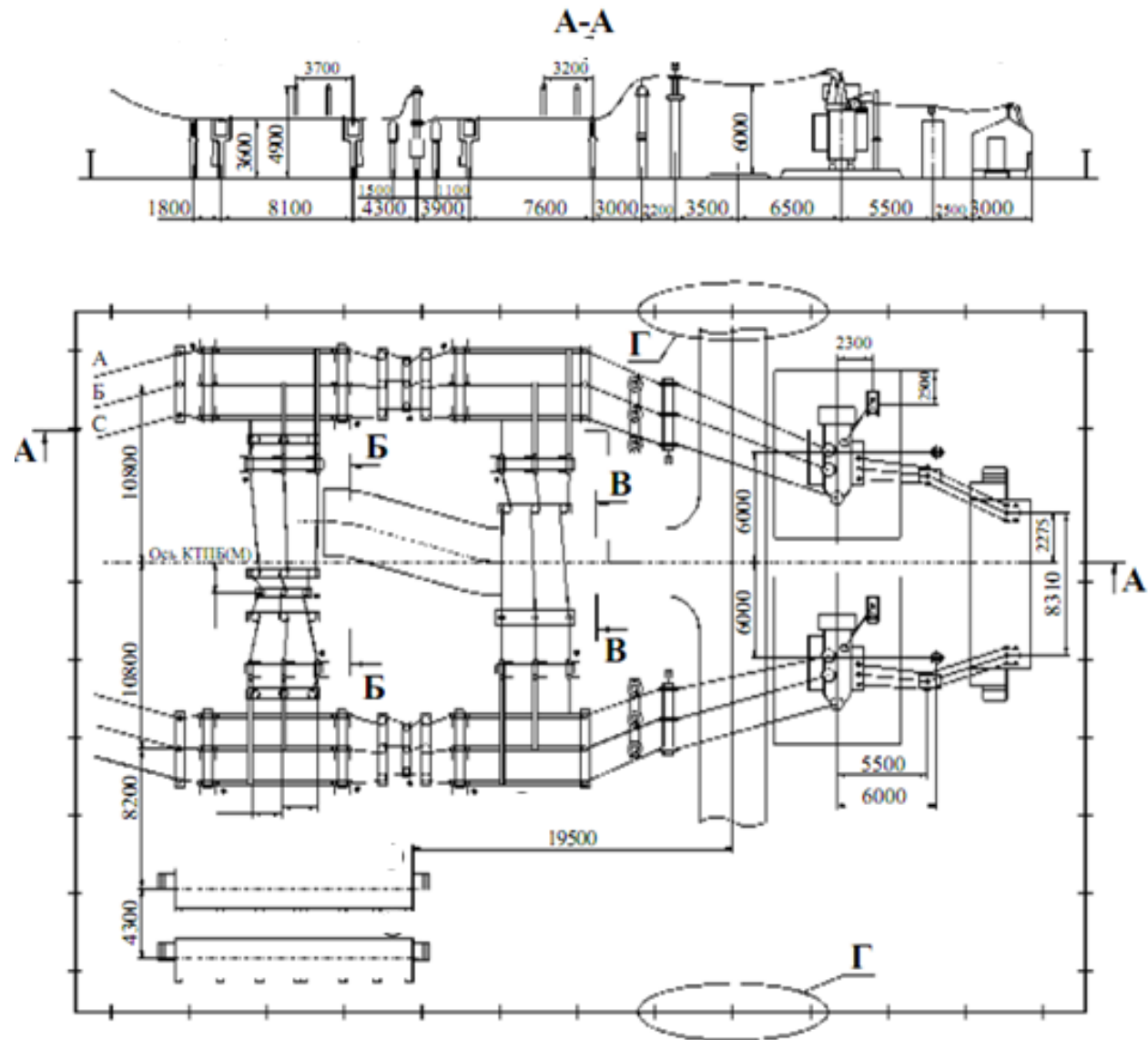


Рисунок П2.6 - Пример плана ОРУ110 кВ по схеме 5АН «Мостик с выключателями в цепях трансформаторов».

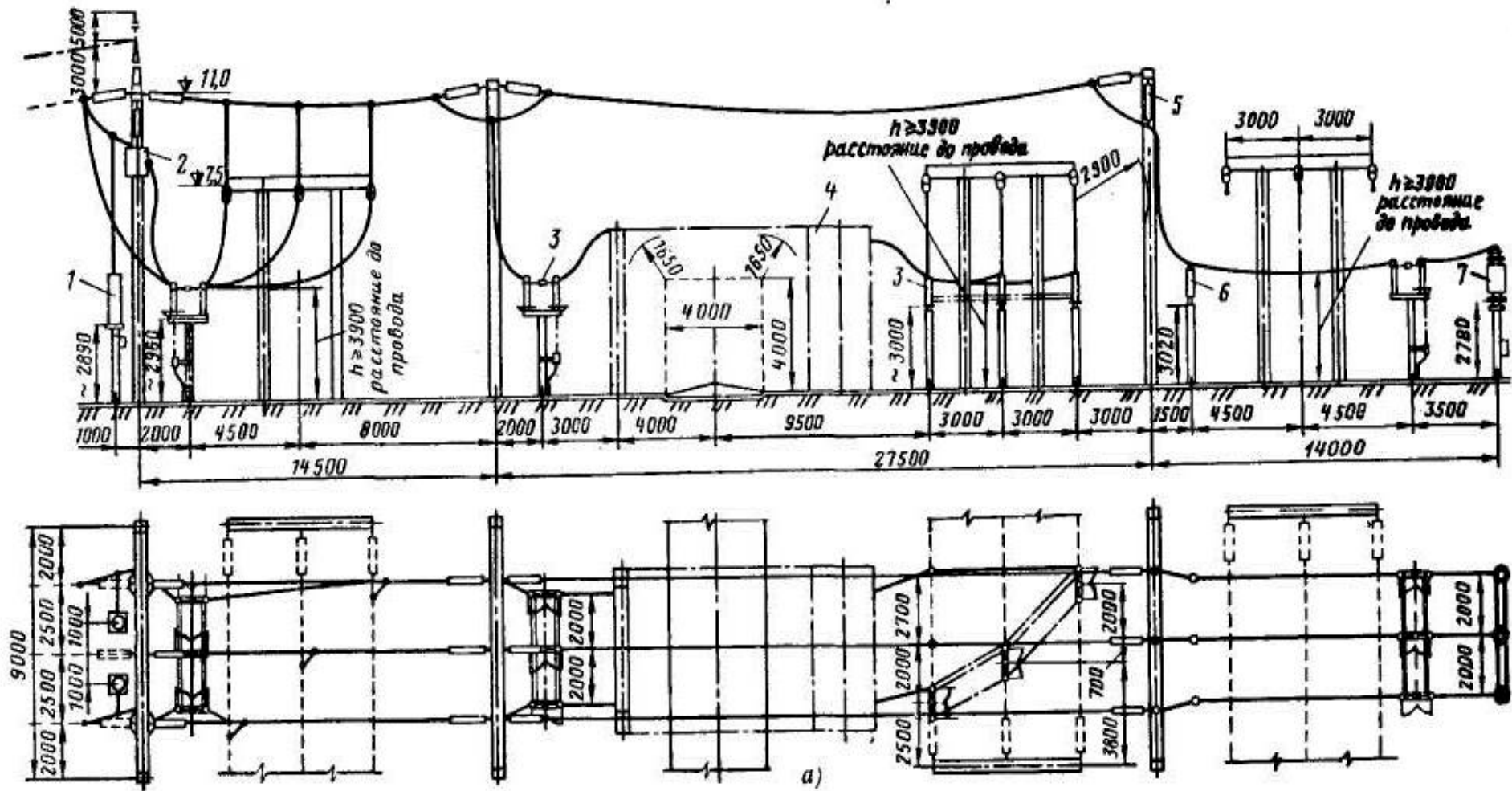
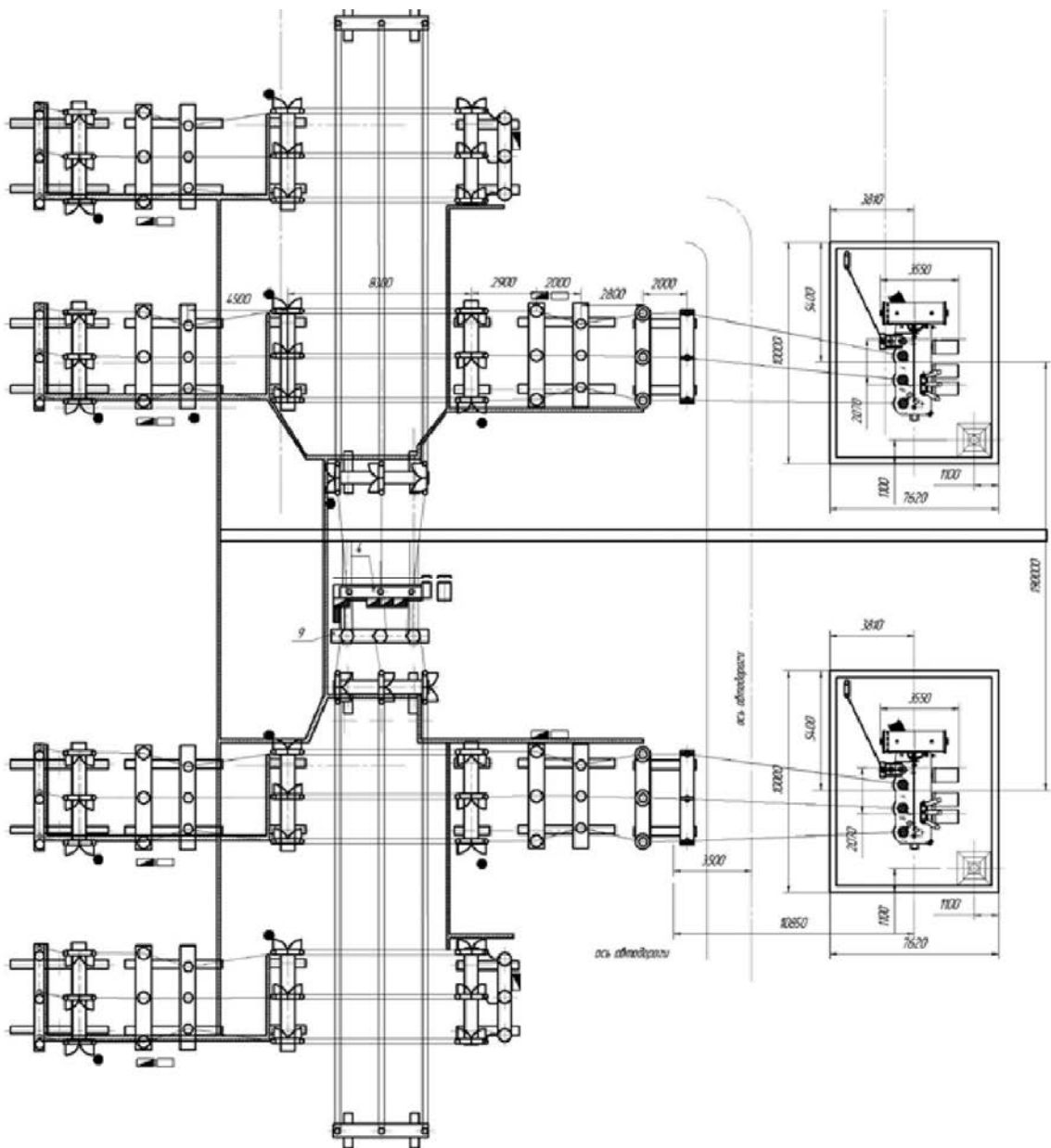


Рисунок П2.7 - Пример плана одной ячейки ОРУ 110 кВ по схеме 7 «Четырёхугольник».



A-A

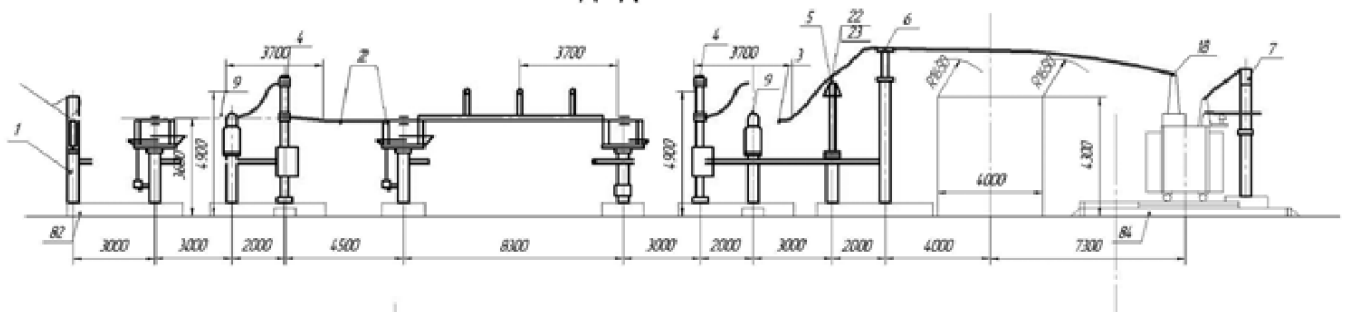


Рисунок П2.8 - Пример плана ОРУ 110 кВ по схеме 9 «одна рабочая секционированная выключателем система шин».

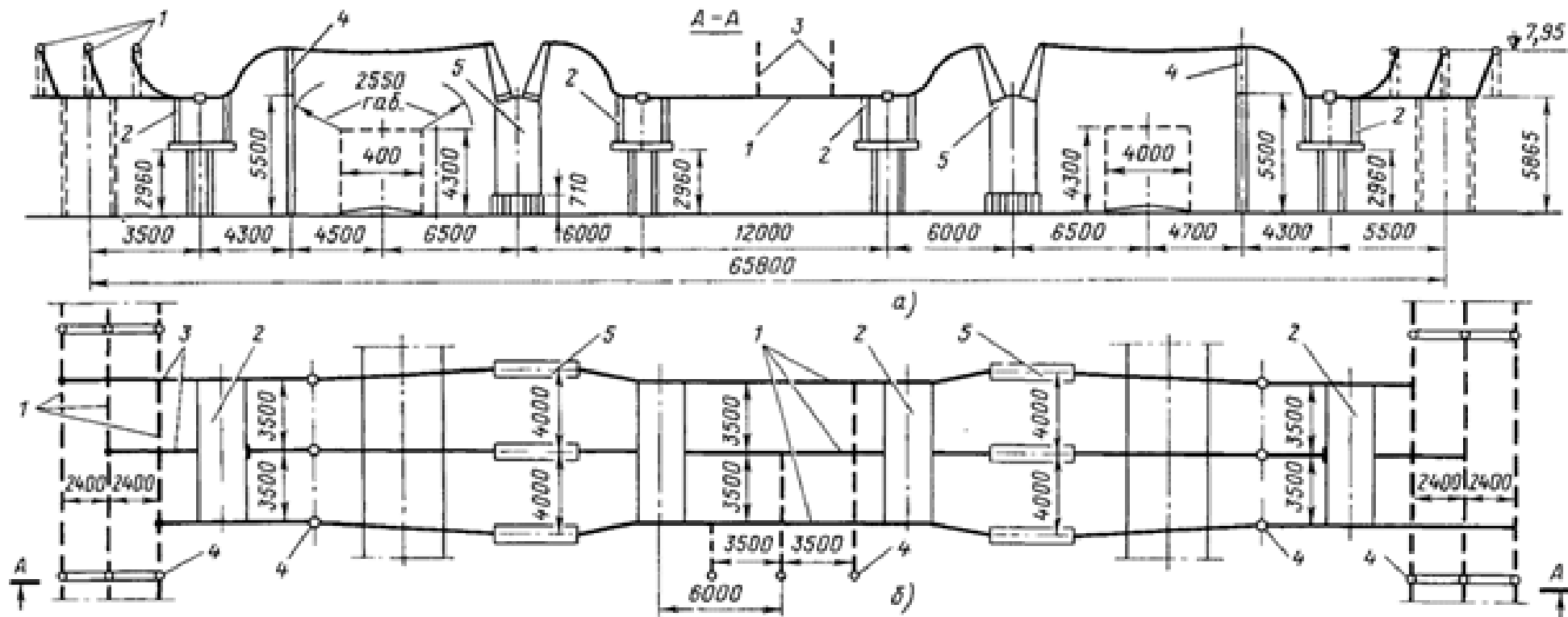


Рисунок П2.9 - Пример плана одной ячейки ОРУ 220 кВ, выполненного по схеме 7- «Четырёхугольник».

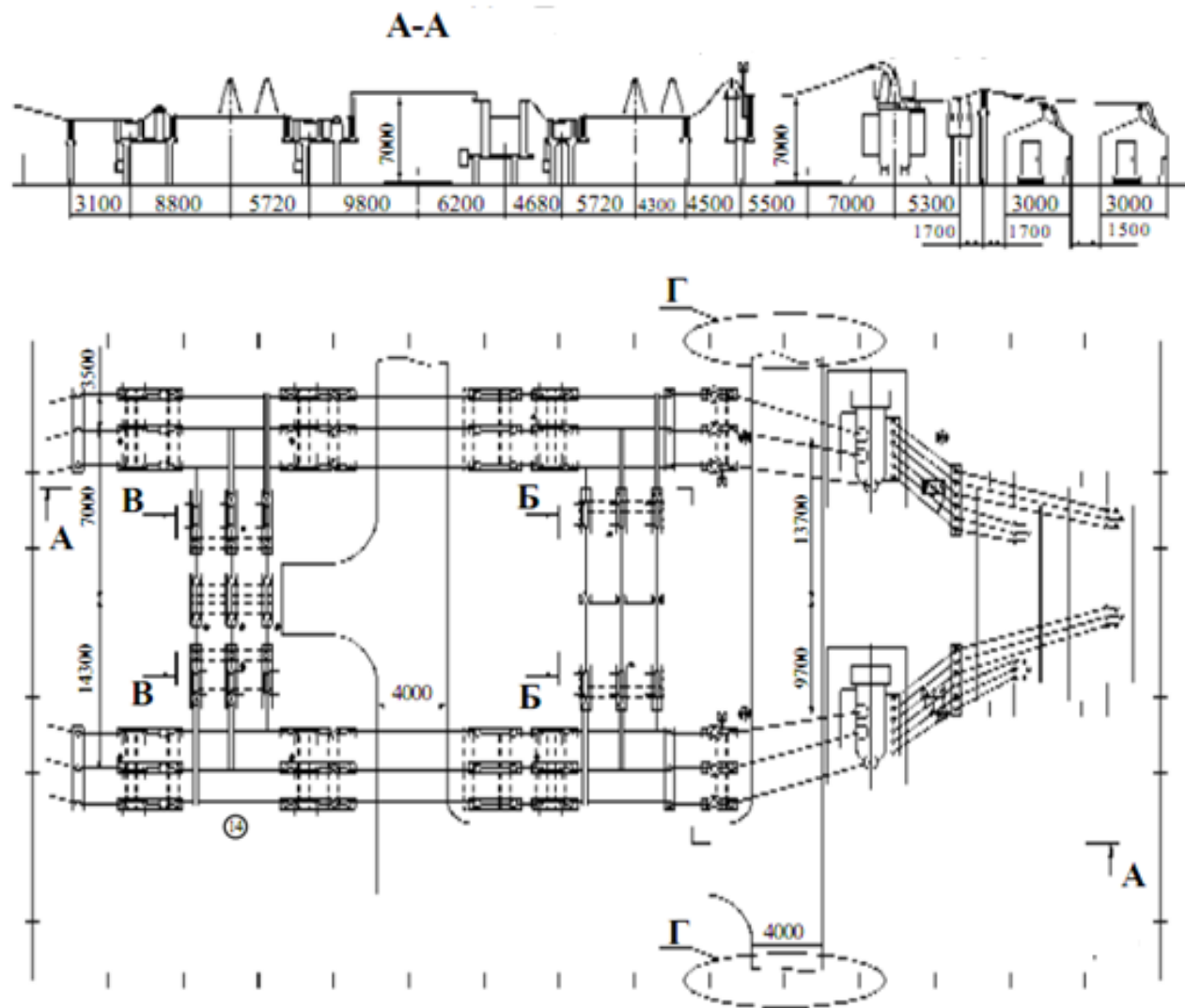


Рисунок П2.10 - Пример плана ОРУ 220 кВ выполненного по схеме 5АН «Мостик с выключателями в цепях трансформаторов».

Отсутствующие в настоящем приложении планы ОРУ 35, 150, 220, 330, 500 кВ следует принять аналогичными планам на напряжение 110 кВ, приняв расстояния согласно таблице П2.1 (таблица из ПУЭ).

Таблица П2.1 - Наименьшие расстояния в свету от токоведущих частей до различных элементов ОРУ (подстанций) 10-750 кВ

Номер рисун ка	Наименование расстояния	Обозначен ие	Изоляционное расстояние, мм, для номинального напряжения, кВ								
			до 10	20	35	110	150	220	330	500	750
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
11 12 13	От токоведущих частей, элементов оборудования и изоляции, находящихся под напряжением, до протяженных заземленных конструкций и до постоянных внутренних ограждений высотой не менее 2 м, а также до стационарных межячейковых экранов и противопожарных перегородок	$A_{\phi-з}$	200	300	400	900	1300	1800 1200	2500 2000	3750 3300	5500 5000
11 12	От токоведущих частей, элементов оборудования и изоляции, находящихся под напряжением, до заземленных конструкций: головка аппарата - опора, провод - стойка, траверса, провод - кольцо, стрежень	$A^1_{\phi-з}$	200	300	400	900	1300	1600 1200	2200 1800	3300 2700	5000 4500
11 12 19	Между токоведущими частями разных фаз	$A_{\phi-\phi}$	220	330	440	100	1400	2000 1600	1800 2200	4200 3400	8000 6500

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13 15	От токоведущих частей, элементов оборудования и изоляции, находящихся под напряжением, до постоянных внутренних ограждений высотой до 1,6 м и до транспортируемого оборудования	'Б'	950	1050	1150	1650	2050	2550 2000	3250 3000	4500 4100	6300 5800
16	Между токоведущими частями разных цепей в разных плоскостях при обслуживаемой нижней цепи и неотключенной верхней	'В'	960	1050	1150	1650	2050	3000 2400	4000 3500	5000 3950	7000 6000
14 13	От неогражденных токоведущих частей до земли или до кровли зданий при наибольшем провисании проводов	'Г'	2900	3000	3100	3600	4000	4500 3900	5000 4700	6450 6000	8200 7200
16 17	Между токоведущими частями разных цепей в разных плоскостях, а также между токоведущими частями разных цепей по горизонтали при обслуживании одной цепи и неотключенной другой	'Д <sup>1</sup> '	2200	2300	2400	2900	3300	3600 3200	4200 3800	5200 4700	7000 6500
18 20	От токоведущих частей до верхней кромки внешнего забора или до здания и сооружения	'Д'	2200	2300	2400	2900	3300	3800 3200	4500 4000	5750 5300	7500 6500
19	От контакта и ножа разъединителя в отключенном положении до ошиновки, присоединенной ко второму контакту	'Ж'	240	365	485	1100	1550	2200 1800	3100 2600	4600 3800	7500 6100

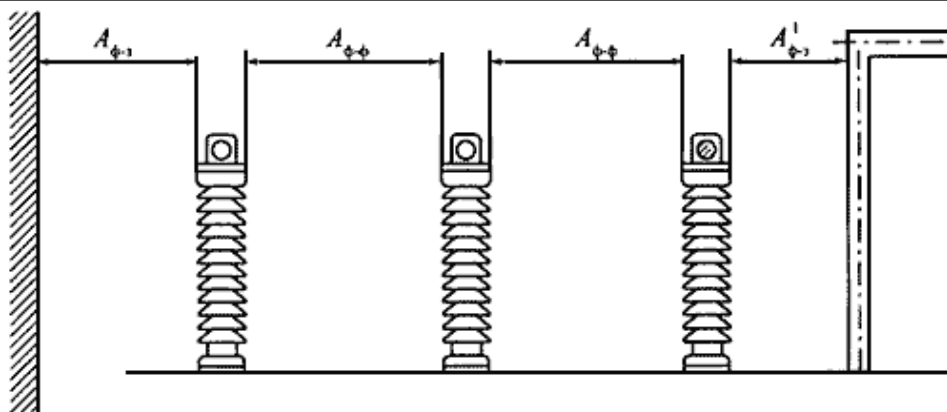


Рисунок П2.11 - Наименьшие расстояния в свету при жестких шинах между токоведущими и заземленными частями ( $A_{\phi-3}, A'_{\phi-3}$ ) и между токоведущими частями разных фаз ( $A_{\phi-\phi}$ ).



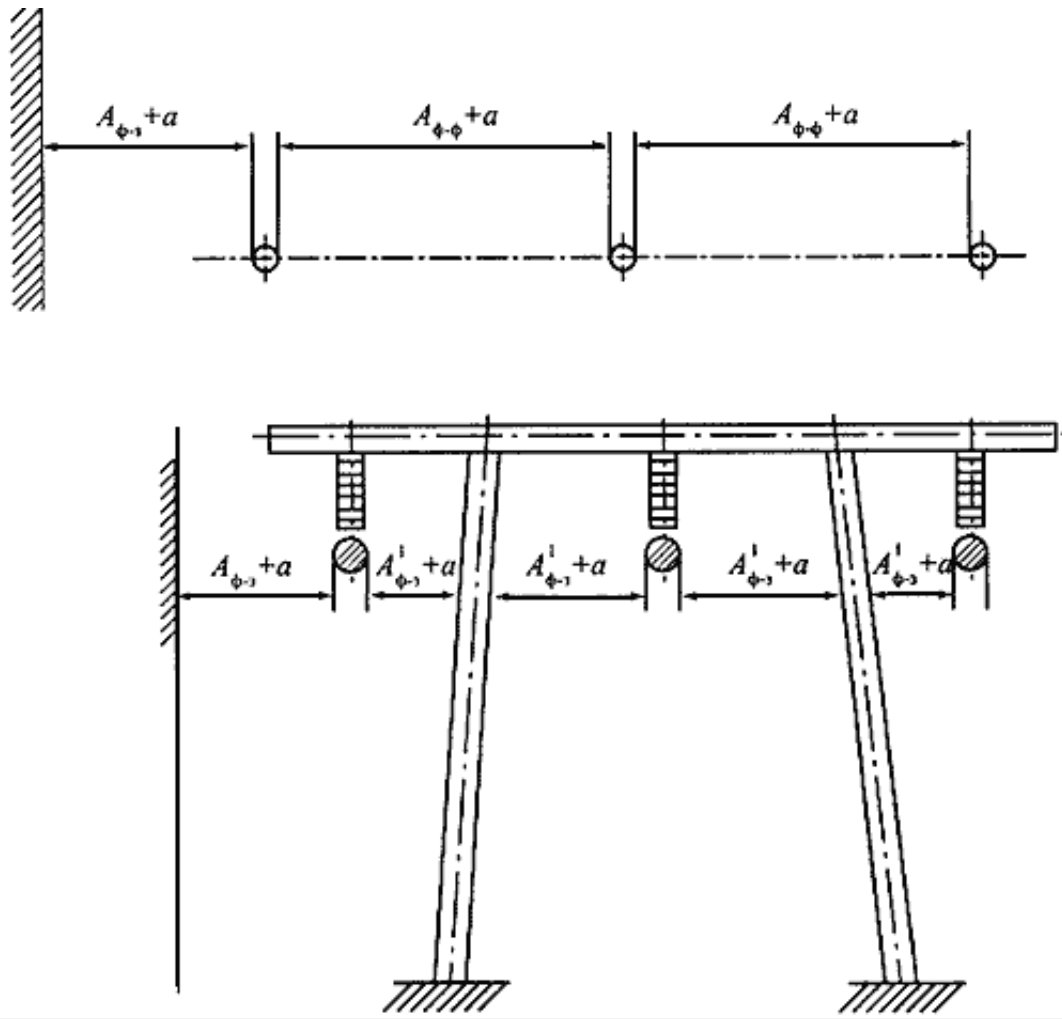


Рисунок П2.12 - Наименьшие расстояния в свету при гибких шинах между токоведущими и заземленными частями и между токоведущими частями разных фаз, расположенными в одной горизонтальной плоскости.

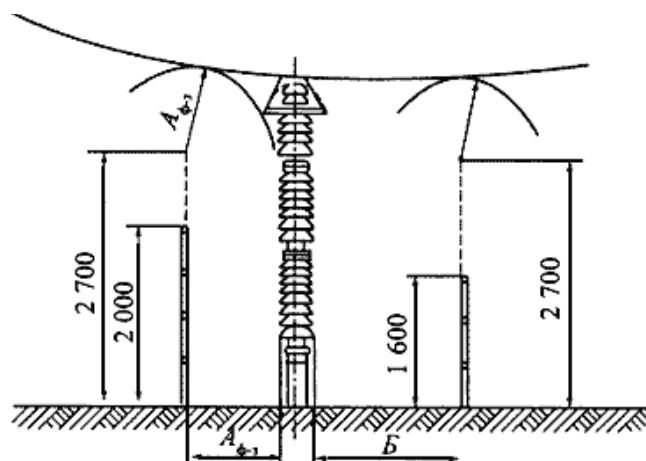


Рисунок П2.13 - Наименьшие расстояния от токоведущих частей и элементов изоляции, находящихся под напряжением, до постоянных внутренних ограждений.

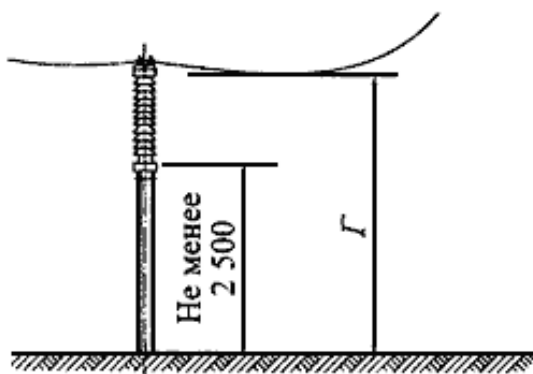


Рисунок П2.14 - Наименьшие расстояния от неогражденных токоведущих частей и от нижней кромки фарфора изоляторов до земли.

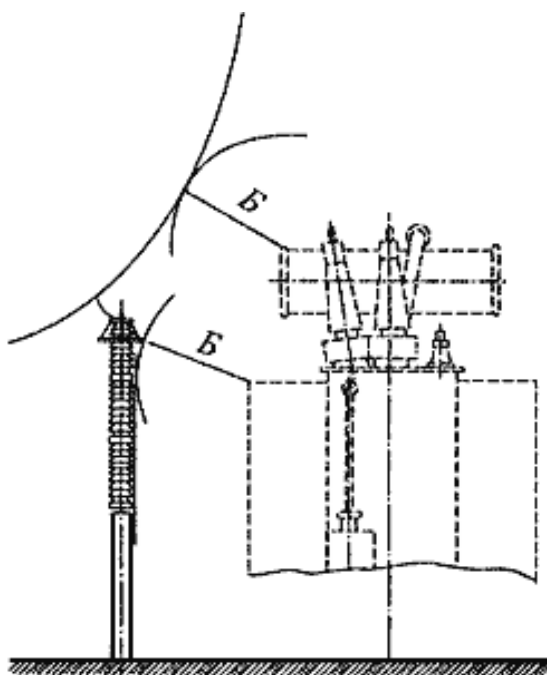


Рисунок П2.15 - Наименьшие расстояния от токоведущих частей до транспортируемого оборудования.

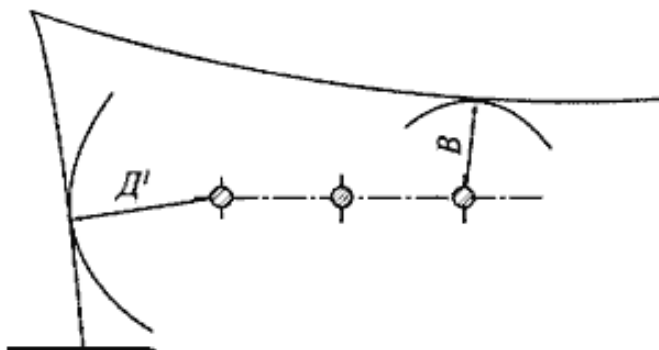


Рисунок П2.16 - Наименьшие расстояния между токоведущими частями разных цепей, расположенными в различных плоскостях с обслуживанием нижней цепи при неотключенной верхней.

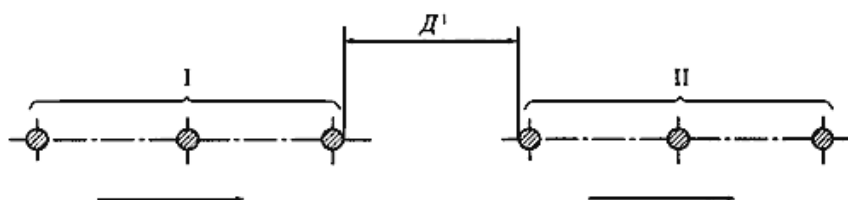


Рисунок П2.17 - Наименьшие расстояния по горизонтали между токоведущими частями разных цепей с обслуживанием одной цепи при неотключенной другой.

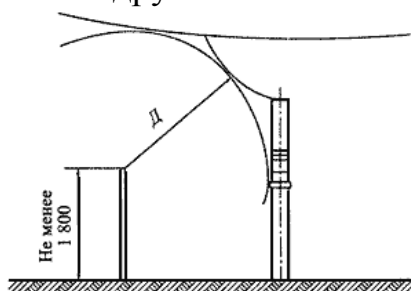


Рисунок П2.18 - Наименьшие расстояния от токоведущих частей до верхней кромки внешнего ограждения.

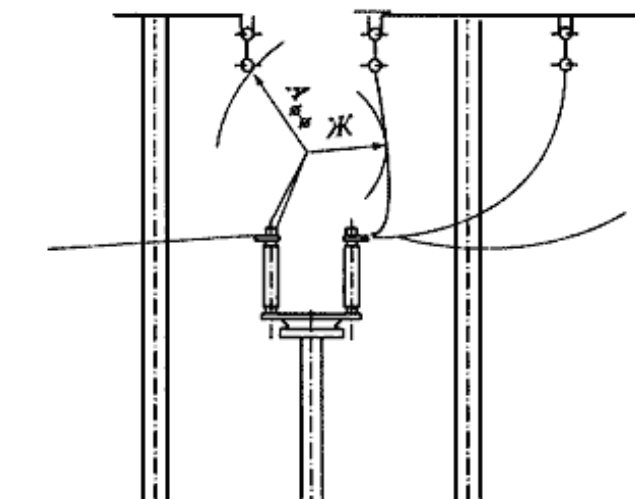


Рисунок П2.19 - Наименьшие расстояния от подвижных контактов разъединителей в отключенном положении до заземленных и токоведущих частей

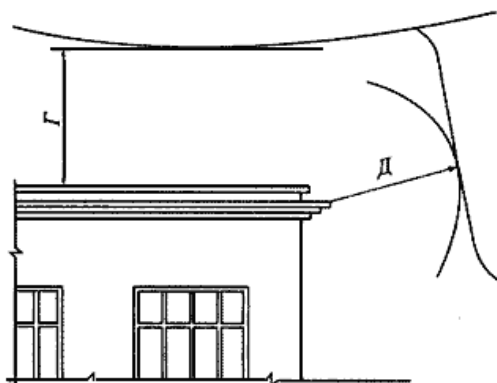


Рисунок П2.20 - Наименьшие расстояния между токоведущими частями и зданиями и сооружениями.