



КГЭУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
 ФЕДЕРАЦИИ  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего образования  
 «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Институт электроэнергетики и электроники

(полное название института)

Электроэнергетические системы и сети

(полное название кафедры)

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

по дисциплине « Подготовка проектов и расчетов режимов, параметров  
 объектов электрических сетей»

**Выполнил:**

Губарев Никита Александрович

обучающийся 4 курса группы ЭС-1-17

(подпись)  
(подпись)

**Руководитель работы:**

Валиуллина Д.М. доцент, ЭСиС

(ФИО, должность, кафедра)

Работа выполнена и  
защита с оценкой

отлично

Дата защиты 22.01.2021

(подпись руководителя) (дата)  
(подпись руководителя) (дата)

Члены комиссии:

С.И. Кост  
(должность)

(подпись)

И.О. Фамилия  
(И.О. Фамилия)

доцент  
(должность)

(подпись)

И.О. Фамилия  
(И.О. Фамилия)

Казань, 2021 г.

## Оглавление

1.	Районная электрическая сеть .....	3
1.1.	Исходные данные.....	3
2.	Формирование вариантов схемы .....	4
3.	Выбор номинальных напряжений электрической сети .....	5
4.	Баланс реактивной мощности и определение мощности компенсирующих устройств.....	7
5.	Выбор силовых трансформаторов понизительной подстанции 10	
6.	Выбор сечения проводников воздушных линий электропередачи .....	12
7.	Выбор схем распределительных устройств.....	18
8.	Технико-экономическое сравнение вариантов РЭС .....	20
9.	Расчет режимов сети .....	27
9.1.	Максимальный режим .....	27
9.1.1.	Определение расчетной нагрузки ПС и расчет потерь в трансформаторах	27
9.2.	Расчет перетоков мощностей с учетом потерь в линии.....	29
9.2.1.	Определение значения напряжения в узловых точках в максимальном режиме на стороне ВН .....	32
9.2.2.	Регулирование напряжения в электрической сети в максимальном режиме	33
9.3.	Послеаварийный режим .....	39
9.3.1.	Определение значения напряжения в узловых точках в послеаварийном режиме	41
9.3.2.	Регулирование напряжения в электрической сети в послеаварийном режиме	42
	ЛИТЕРАТУРА .....	45

# 1. Районная электрическая сеть

## 1.1. Исходные данные

Схема расположения точек нагрузки в электрической сети:

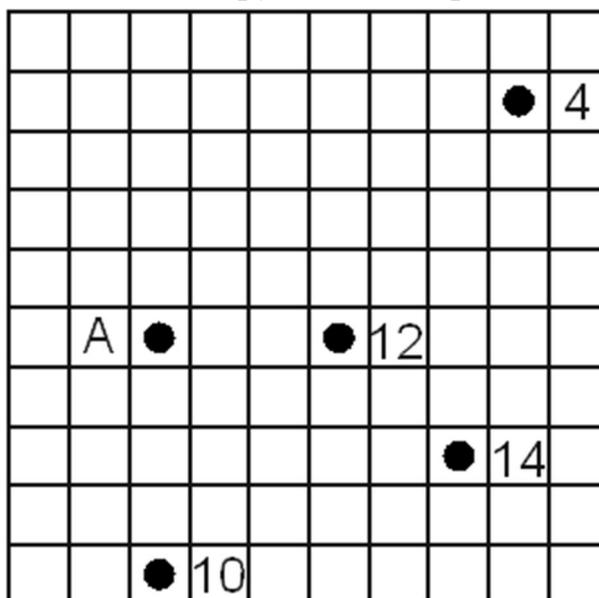


Рисунок 1. Расположение узлов нагрузки

Масштаб: в 1-й клетке – 9км;

Коэффициент мощности на подстанции «А», о.е. – 0,95;

Напряжение на шинах подстанции «А» -  $U_{\max}=119$  кВ,  $U_{\text{авар}}=110$  кВ;

Район по гололёду – IV;

Число часов использования максимальной нагрузки –  $T_{\max}= 3600$  часов;

Таблица 1.

Максимальная активная нагрузка и коэффициент мощности на подстанциях				
№ п/ст	4	10	12	14
$P_{\max}$ (МВт)	27	38	32	24
$\cos\mu$	0,79	0,81	0,78	0,83

## 2. Формирование вариантов схемы

Вариант 1:

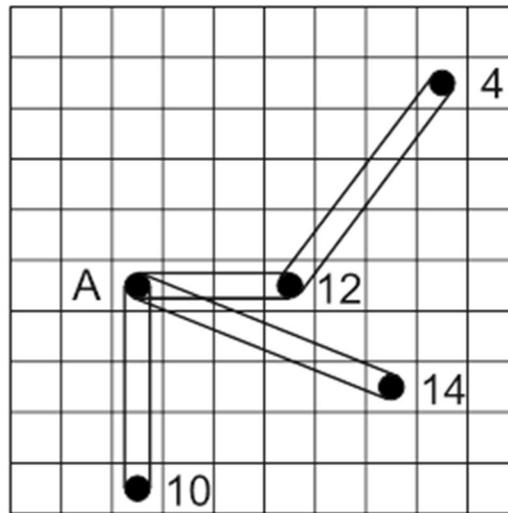


Рисунок 2 Схема №1

Таблица 2

Длины линий на участках цепи					
Участок	A-10	A-14	A-12	12-4	Общее
L, км	72	115,2	72	68,4	327,6

Вариант 2:

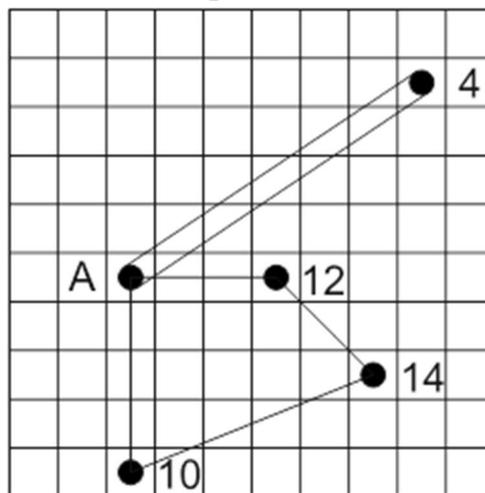


Рисунок 3 Схема №2

Таблица 3.

Длины линий на участках цепи						
Участок	A-4	A-12	12-14	14-10	A'-10	Общее
L, км	136,8	39,6	27	68,4	36	171

### 3. Выбор номинальных напряжений электрической сети

Все элементы электрической сети, а также электроприёмники выполняются на определённое номинальное напряжение и могут работать при значениях напряжения, отличающихся от номинального лишь с некоторыми допусками. Все элементы сети обладают определёнными сопротивлениями, по этому токи в них вызывают изменение напряжения, в результате комплексные значения напряжения во всех узлах сет получаются различными. Величина  $U_{ном}$ , кВ зависит от передаваемой мощности. Напряжение для выбранного варианта конфигурации электрической сети предварительно определяется по формуле Г.А. Илларионова [4]:

$$U_{ном} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L} + \frac{2500}{P}}}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина линии, км;  $P$  – передаваемая мощность на одну цепь, МВт.

Определяю направления потоков мощности для первого и второго вариантов конфигурации схемы:

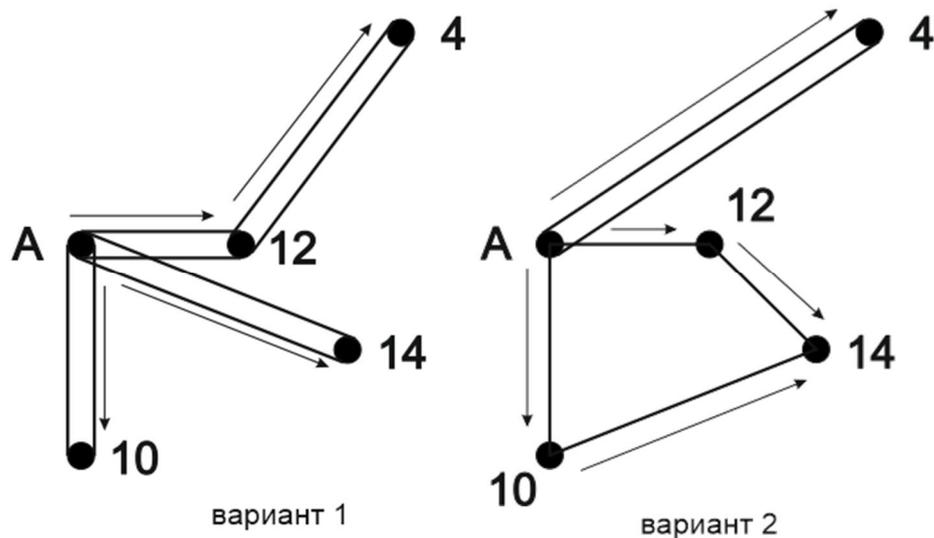


Рисунок 4. Направление потоков мощностей

Согласно потокам мощностей, рассчитываю мощности, протекающие по линиям, без учёта потерь мощности для первого варианта.

$$P_{A-10} = \frac{P_{10}}{2} = \frac{38}{2} = 19 \text{ МВт}$$

$$P_{A-14} = \frac{P_{14}}{2} = \frac{24}{2} = 12 \text{ МВт}$$

$$P_{A-12} = \frac{P_{12} + P_4}{2} = \frac{32 + 27}{2} = 32 \text{ МВт}$$

$$P_{12-4} = \frac{P_4}{2} = \frac{27}{2} = 13,5 \text{ МВт}$$

Для выбранной конфигурации сети предварительно определяю экономически целесообразные напряжения  $U_{\text{ном}}^{\text{э}}$ , кВ по формуле (1):

$$U_{\text{ном,А-10}}^{\text{э}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L_{\text{А-10}}} + \frac{2500}{P_{\text{А-10}}}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{72} + \frac{2500}{19}}} = 84,96 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{ном,А-14}}^{\text{э}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L_{\text{А-14}}} + \frac{2500}{P_{\text{А-14}}}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{115,2} + \frac{2500}{12}}} = 68,57 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{ном,А-12}}^{\text{э}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L_{\text{А-12}}} + \frac{2500}{P_{\text{А-12}}}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{72} + \frac{2500}{32}}} = 108,42 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{ном,12-4}}^{\text{э}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L_{12-4}} + \frac{2500}{P_{12-4}}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{68,4} + \frac{2500}{13,5}}} = 72,08 \text{ кВ}$$

Определяю среднее арифметическое экономические напряжения сети:

$$\sum U_{\text{ном}}^{\text{э}} = \frac{84,96 + 68,57 + 108,42 + 72,08}{4} = 83,5 \text{ кВ}$$

Для данной конфигурации сети целесообразно выбрать номинальное напряжение ВН сети  $U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$ .

Аналогичным образом определяю номинальное напряжение для второго варианта.

$$P_{\text{А-4}} = \frac{P_4}{2} = \frac{27}{2} = 13,5 \text{ МВт}$$

Для расчёта участка сети «кольцо», разрезаю его в точке питания А, представив в виде участка с двухсторонним питанием.

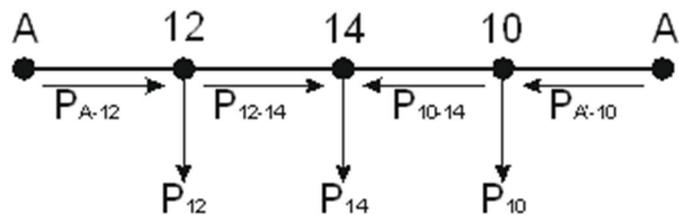


Рисунок 5. Разрез кольца в точке А

$$P_{\text{А-12}} = \frac{P_{12}(L_{12-14} + L_{10-14} + L_{\text{А}'-10}) + P_{14}(L_{10-14} + L_{\text{А}'-10}) + P_{10}(L_{\text{А}'-10})}{\sum L},$$

$$P_{\text{А-12}} = \frac{32(27 + 68,4 + 36) + 24(68,4 + 36) + 38 * 36}{171} = 47,24 \text{ МВт},$$

$$P_{\text{А}'-10} = \frac{P_{10}(L_{10-14} + L_{12-14} + L_{\text{А}-12}) + P_{14}(L_{12-14} + L_{\text{А}-12}) + P_{12}(L_{\text{А}-12})}{\sum L},$$

$$P_{A'-10} = \frac{38(68,4 + 27 + 39,6) + 24(27 + 39,6) + 38 * 39,6}{171} = 46,76 \text{ МВт},$$

$$P_{10-14} = \frac{P_{14}(L_{12-14} + L_{A-12}) + P_{10}(L_{A'-10}) + P_{12}(L_{A-12})}{\sum L},$$

$$P_{10-14} = \frac{24(27 + 39,6) + 38 * 36 + 32 * 39,6}{171} = 8,76 \text{ МВт},$$

$$P_{14-12} = P_{A-12} - P_{12} = 47,24 - 32 = 15,24 \text{ МВт},$$

$$U_{\text{НОМ},A-4}^{\text{Э}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L_{A-4}} + \frac{2500}{P_{A-4}}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{136,8} + \frac{2500}{19}}} = 71,57 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{НОМ},A-12}^{\text{Э}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L_{A-12}} + \frac{2500}{P_{A-12}}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{39,6} + \frac{2500}{46,76}}} = 133,82 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{НОМ},12-14}^{\text{Э}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L_{12-14}} + \frac{2500}{P_{12-14}}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{27} + \frac{2500}{15,24}}} = 77,4 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{НОМ},10-14}^{\text{Э}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L_{10-14}} + \frac{2500}{P_{10-14}}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{68,4} + \frac{2500}{8,76}}} = 71,57 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{НОМ},A-10}^{\text{Э}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L_{A-10}} + \frac{2500}{P_{A-10}}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{36} + \frac{2500}{47,76}}} = 133,17 \text{ кВ}$$

$$\sum U_{\text{НОМ}}^{\text{Э}} = \frac{71,57 + 133,82 + 77,4 + 71,57 + 133,17}{5} = 101,12 \text{ кВ}$$

Для данной конфигурации сети целесообразно выбрать номинальное напряжение ВН сети  $U_{\text{НОМ}} = 110 \text{ кВ}$ .

#### 4. Баланс реактивной мощности и определение мощности компенсирующих устройств

Основной целью составления баланса мощности является обеспечение работы электрической системы с допустимыми параметрами во всех режимах в течении года. Баланс составляется отдельно для активной и реактивной мощностей. Следует отметить, что реактивная мощность нагрузки электрической системы в большей мере, чем активная, определяется потерями сети. Чем ближе к месту потребления реактивной мощности, тем меньше значения передаваемой реактивной мощности по элементам сети и тем выше уровень напряжения в сети. Все это приводит к уменьшению потерь

реактивной мощности в сети и снижению суммарной установленной мощности компенсирующих устройств.

В процессе эксплуатации составление баланса мощности приходится выполнять систематически в целях выяснения условий работы электрической системы и её отдельных частей с учётом фактического наличия оборудования, его текущего состояния и роста нагрузок.

Наибольшая суммарная активная мощность, потребляемая в проектируемой сети, определяется по формуле:

$$P_{\Pi, \text{нб}} = (K_0 + \Delta P_c) * \sum P_{\text{нб}, i}, \quad (2)$$

где,  $\Delta P_c = 0,05$ ,  $K_0 = 0,95$ .

$$P_{\Pi, \text{нб}} = (K_0 + \Delta P_c) * (P_4 + P_{10} + P_{12} + P_{14}),$$

$$P_{\Pi, \text{нб}} = (0,95 + 0,05) * (27 + 38 + 32 + 24) = 121 \text{ МВт},$$

Далее для каждого узла определяю реактивную нагрузку  $i$ -го узла  $Q_{\text{нб}, i}$  [Мвар] и наибольшую полную нагрузку  $i$ -го узла  $S_{\text{нб}, i}$  [МВА]:

$$Q_{\text{нб}, i} = P_{\text{нб}, i} * \operatorname{tg} \varphi_i, \quad (3)$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \varphi_i = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_i}}{\cos \varphi_i},$$

$$S_{\text{нб}, i} = \sqrt{P_{\text{нб}, i}^2 + Q_{\text{нб}, i}^2},$$

Таблица 4.

Коэффициенты мощности подстанций					
№ п\ст	А	4	10	12	14
$\cos \varphi$	0,95	0,79	0,81	0,78	0,83
$\operatorname{tg} \varphi$	0,33	0,78	0,72	0,802	0,67

$$Q_{\text{нб}, 4} = P_{\text{нб}, 4} * \operatorname{tg} \varphi_4 = 20,95 \text{ МВАр},$$

$$Q_{\text{нб}, 10} = P_{\text{нб}, 10} * \operatorname{tg} \varphi_{10} = 27,51 \text{ МВАр},$$

$$Q_{\text{нб}, 12} = P_{\text{нб}, 12} * \operatorname{tg} \varphi_{12} = 25,67 \text{ МВАр},$$

$$Q_{\text{нб}, 14} = P_{\text{нб}, 14} * \operatorname{tg} \varphi_{14} = 16,13 \text{ МВАр},$$

$$S_{\text{нб}, 4} = \sqrt{P_{\text{нб}, 4}^2 + Q_{\text{нб}, 4}^2} = \sqrt{27^2 + 20,95^2} = 34,18 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{нб}, 10} = \sqrt{P_{\text{нб}, 10}^2 + Q_{\text{нб}, 10}^2} = \sqrt{38^2 + 27,51^2} = 46,91 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{нб}, 12} = \sqrt{P_{\text{нб}, 12}^2 + Q_{\text{нб}, 12}^2} = \sqrt{32^2 + 25,67^2} = 41,03 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{нб}, 14} = \sqrt{P_{\text{нб}, 14}^2 + Q_{\text{нб}, 14}^2} = \sqrt{24^2 + 16,13^2} = 28,92 \text{ МВА}$$

Для воздушных линий 110 кВ в первом приближении допускается принимать равными потери и генерацию реактивной мощности в линиях. Оценить приближённо потери в трансформаторах  $\Delta Q_{T\Sigma}$ , МВАр можно по формуле:

$$\Delta Q_{\Sigma T} = 0.1 * \sum (\alpha_{Ti} * S_{Ti}),$$

где  $\alpha_{Ti} = 1$ ;

$$\Delta Q_{\Sigma T} = 0.1 * [\alpha_{Ti} * (S_{нб,4} + S_{нб,10} + S_{нб,12} + S_{нб,14})],$$

$$\Delta Q_{\Sigma T} = 0.1 * [1 * (34.18 + 46.91 + 41.03 + 28.92)] = 15.1 \text{ МВАр},$$

Для воздушных линий 110 кВ в первом приближении допускается принимать потери на генерацию реактивной мощности в линиях, т.е:

$$\Delta Q_i - \Delta Q_{ci} = 0,$$

Отсюда:

$$Q_{П,нб} = 0,98 * (Q_{нб4} + Q_{нб4} + Q_{нб4} + Q_{нб4}) + \Delta Q_{\Sigma T},$$

$$Q_{П,нб} = 0,98 * (20,95 + 27,51 + 25,67 + 16,13) + 15,03 = 103.57 \text{ МВАр},$$

Значение реактивной мощности  $Q_c$ , МВАр для данной схемы можно определить как:

$$Q_c = P_{П,нб} * tg\varphi_A = 121 * 0.33 = 39.93 \text{ МВАр},$$

Так как  $Q_{П,нб} < Q_c$ , то в проектируемой сети должны быть установлены компенсирующие устройства, суммарная мощность которых  $Q_{k\Sigma}$ , МВАр определяется как:

$$Q_{k\Sigma} = Q_{П,нб} - Q_c = 103,57 - 59,93 = 63,64 \text{ МВАр},$$

Так как проектируется сеть 110 кВ, то базовый экономический коэффициент реактивной мощности  $tg\varphi_K = 0.3$ .

Мощности компенсирующих устройств определяются по двум параметрам, из которых выбирается наибольшее:

$$Q_{k,i} = P_{нб,i} * (tg\varphi_i - tg\varphi_A),$$

$$Q_{k,i} = P_{нб,i} * (tg\varphi_i - tg\varphi_K),$$

1.

$$Q_{k,4} = P_{нб,4} * (tg\varphi_4 - tg\varphi_A) = 27 * (0,78 - 0,33) = 12,08 \text{ МВАр},$$

$$Q_{k,10} = P_{нб,10} * (tg\varphi_{10} - tg\varphi_A) = 38 * (0,81 - 0,33) = 15,02 \text{ МВАр},$$

$$Q_{k,12} = P_{нб,12} * (tg\varphi_{12} - tg\varphi_A) = 32 * (0,78 - 0,33) = 15,16 \text{ МВАр},$$

$$Q_{k,14} = P_{нб,14} * (tg\varphi_{14} - tg\varphi_A) = 24 * (0,85 - 0,33) = 6,99 \text{ МВАр},$$

2.

$$Q_{k,4} = P_{нб,4} * (tg\varphi_4 - tg\varphi_K) = 27 * (0,78 - 0,3) = 12,85 \text{ МВАр},$$

$$Q_{k,10} = P_{нб,10} * (tg\varphi_{10} - tg\varphi_K) = 38 * (0,81 - 0,3) = 16,11 \text{ МВАр},$$

$$Q_{k,12} = P_{нб,12} * (tg\varphi_{12} - tg\varphi_K) = 32 * (0,78 - 0,3) = 16,07 \text{ МВАр},$$

$$Q_{k,14} = P_{нб,14} * (tg\varphi_{14} - tg\varphi_A) = 24 * (0,85 - 0,3) = 7,67 \text{ МВАр},$$

Таким образом, выбираю компенсирующие устройства типа УКРМ. Данные устройства предназначены для компенсации реактивной мощности в электросети: установка включает/отключает необходимое количество конденсаторов в зависимости от заданного в сети значения  $\cos\varphi$ . Кроме этого она служит для повышения коэффициента мощности электрооборудования промышленных предприятий и распределительных сетей на напряжение 10 кВ частотой 50 Гц.

Таблица 5.

№ п/ст	Количество КУ	Тип КУ	Мощность КУ, МВАр
4	4	УКРМ-10,5-3250 У3	13
10	4	УКРМ-10,5-4050 У3	16,2
12	4	УКРМ-10,5-4050 У3	16,2
14	4	УКРМ-10,5-2000 У3	8

Нахожу реактивную мощность, потребляемую в узлах из системы с учётом компенсирующих устройств  $Q$ , МВАр:

$$Q_i = Q_{нб,i} - Q_{ki},$$

$$Q_4 = 20,96 - 12,85 = 8,1 \text{ МВАр},$$

$$Q_{10} = 27,51 - 16,11 = 11,4 \text{ МВАр},$$

$$Q_{12} = 25,67 - 16,07 = 9,6 \text{ МВАр},$$

$$Q_{14} = 16,13 - 7,67 = 8,4 \text{ МВАр},$$

Определяю полную мощность с учётом компенсирующих устройств в сети:

$$S_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2},$$

$$S_4 = \sqrt{27^2 + 8,1^2} = 28,19 \text{ МВАр},$$

$$S_{10} = \sqrt{38^2 + 11,4^2} = 39,67 \text{ МВАр},$$

$$S_{12} = \sqrt{32^2 + 9,6^2} = 33,41 \text{ МВАр},$$

$$S_{14} = \sqrt{24^2 + 8,4^2} = 25,45 \text{ МВАр},$$

## 5. Выбор силовых трансформаторов понизительной подстанции

Количество трансформаторов выбирается с учётом категорий потребителей по степени надёжности. Так как по условиям курсового проекта, на всех подстанциях имеются потребители 1-ой категории и  $P_{max} \geq$

10 МВт, то число устанавливаемых трансформаторов должно быть не менее двух. В соответствии с существующей практикой проектирования и ПУЭ и ГОСТ 14209–97 «Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов», мощность трансформаторов на понижающих подстанциях рекомендуется выбирать из условия допустимой перегрузки в послеаварийных режимах до 10% в течении 2-х часов.

Расчетная мощность одного трансформатора на подстанции с учетом допустимой перегрузки в послеаварийном режиме определяется по формуле:

$$S_{Ti} = \frac{S_i}{(N_T - 1) * K_{пер}}$$

где  $K_{пер}$  – допустимый коэффициент перегруза для трансформаторов при продолжительности перегрузки в течение суток, равной, согласно заданию,  $t_{пер.сут.} = 8$  ч,  $K_{пер} = 1,1$ ;  $S_i$  – мощность, потребляемая в узле из системы с учётом КУ.

$$S_{p4} = \frac{S_4}{K_{пер}} = \frac{28,19}{1,1} = 25,63 \text{ МВА,}$$

$$S_{p10} = \frac{S_4}{K_{пер}} = \frac{39,67}{1,1} = 36,1 \text{ МВА,}$$

$$S_{p12} = \frac{S_4}{K_{пер}} = \frac{33,41}{1,1} = 30,37 \text{ МВА,}$$

$$S_{p14} = \frac{S_4}{K_{пер}} = \frac{25,4}{1,1} = 23,14 \text{ МВА,}$$

По [4, табл. 5.18] выбираю соответствующие типы трансформаторов:

Таблица 6.

№ узла	$S_i$ , МВА	$S_{pi}$ , МВА	Тип и количество трансформаторов
4	28,19	25,63	2 X ТРДН-40000/110
10	39,67	36,1	2 X ТРДН-40000/110
12	33,41	30,37	2 X ТРДН-40000/110
14	25,41	23,14	2 X ТРДН-25000/110

Таблица 7.

Паспортные данные выбранных трансформаторов		
	ТРДН 25000/110	ТРДН 40000/110
$S_{\text{НОМ}}$ , МВА	25	40
Пределы регулирования	$\mp 9 * 1,78$	$\mp 9 * 1,78$
$U_{\text{НОМ}}$ ВН, кВ	115	115
$U_{\text{НОМ}}$ НН, кВ	11	6,3-10,5
$U_{\text{к}}$ ВН-НН, %	10,5	10,5
$U_{\text{к}}$ ВН-НН1, %	20	20
$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт	120	172
$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	27	36
$I_{\text{ХХ}}$ %	0,7	0,65
$\Delta Q_{\text{х}}$ , кВАр	175	260
$\Delta U_{\text{отв}}$ %	1,78	1,78

## 6. Выбор сечения проводников воздушных линий электропередачи

Сечения проводников  $F$  выбираются по экономической плотности тока:

$$F = \frac{I_P}{J}, \quad (4)$$

где  $J$  – экономическая плотность тока, для  $T_{\text{max}}=3600$  ч,  $J=1.1$ ;

$I_P$  – токовая нагрузка линии, определяемая как:

$$I_P = I_{\text{нб}} * \alpha_i * \alpha_t, \quad (5)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент, учитывающий изменение нагрузки по годам эксплуатации линии, для линий 110 кВ принимается равным 1,05;  $\alpha_t$  – коэффициент, учитывающий число часов использования максимальной нагрузки линии,  $\alpha_t = 0,8$ ;

Вариант №1

Перетоки мощностей в линиях без учёта потерь:

$$S_{A-10} = \frac{S_{10}}{2} = \frac{39,67}{2} = 19,84 \text{ МВА},$$

$$S_{A-14} = \frac{S_{14}}{2} = \frac{25,45}{2} = 12,73 \text{ МВА},$$

$$S_{A-12} = \frac{S_{12} + S_4}{2} = \frac{33,41 + 28,19}{2} = 30,8 \text{ МВА},$$

$$S_{12-4} = \frac{S_4}{2} = \frac{28,19}{2} = 14,1 \text{ МВА},$$

По формуле (5) нахожу токовую нагрузку  $I_P$ :

$$I_{H6} = \frac{S_i}{\sqrt{3} * U_{НОМ}} \rightarrow I_P = \frac{S_i}{\sqrt{3} * U_{НОМ}} * \alpha_i \alpha_t,$$

$$I_{PA-10} = \frac{S_{A-10}}{\sqrt{3} * U_{НОМ}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{19,84 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 87.47 \text{ A},$$

$$I_{PA-14} = \frac{S_{A-14}}{\sqrt{3} * U_{НОМ}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{12,73 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 56,13 \text{ A},$$

$$I_{PA-12} = \frac{S_{A-12}}{\sqrt{3} * U_{НОМ}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{30,8 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 135,79 \text{ A},$$

$$I_{P12-4} = \frac{S_{12-4}}{\sqrt{3} * U_{НОМ}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{14,1 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 62,17 \text{ A},$$

Сечение проводников определяю по формуле (4):

$$F_i = \frac{I_{P,i}}{j},$$

$$F_{A-10} = \frac{I_{P,A-10}}{j} = \frac{87.47}{1.1} = 79.52 \text{ мм}^2,$$

$$F_{A-14} = \frac{I_{P,A-14}}{j} = \frac{56.13}{1.1} = 51.02 \text{ мм}^2,$$

$$F_{A-12} = \frac{I_{P,A-12}}{j} = \frac{135.79}{1.1} = 123.45 \text{ мм}^2,$$

$$F_{12-4} = \frac{I_{P,12-4}}{j} = \frac{62.17}{1.1} = 56.51 \text{ мм}^2,$$

Таблица 8.

Предварительный выбор проводников, с учётом района по гололёду IV		
Линия	Марка проводника	Допустимы ток, А
A-10	АС-120/27	390
A-14	АС-120/27	390
A-12	АС-150/27	450
12-4	АС-120/27	390

По условию  $I_{авар} < I_{доп}$ , произвожу расчёт в послеаварийном режиме.

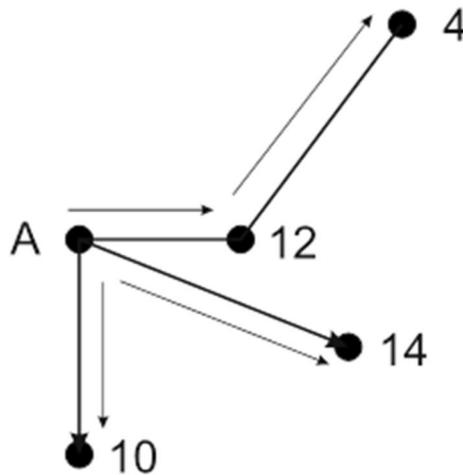


Рисунок 6. Послеаварийный режим сети, вариант №1

$$S_{\text{авар},A-10} = S_{10} = 39,67 \text{ МВА},$$

$$S_{\text{авар},A-14} = S_{14} = 25,45 \text{ МВА},$$

$$S_{\text{авар},A-12} = S_{12} + S_4 = 33,41 + 28,19 = 61,6 \text{ МВА},$$

$$S_{\text{авар},12-4} = S_4 = 28,19 \text{ МВА},$$

$$I_{\text{авар},A-10} = \frac{S_{\text{авар},A-10}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{39,67 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1,05 * 0,8 = 174,9 \text{ А},$$

$$I_{\text{авар},A-14} = \frac{S_{\text{авар},A-14}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{25,45 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1,05 * 0,8 = 112,21 \text{ А},$$

$$I_{\text{авар},A-12} = \frac{S_{\text{авар},A-12}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{61,6 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1,05 * 0,8 = 271,57 \text{ А},$$

$$I_{\text{авар},12-4} = \frac{S_{\text{авар},12-4}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{28,19 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1,05 * 0,8 = 124,29 \text{ А},$$

Таким образом, в послеаварийном режиме, рабочие токи не превышают допустимого тока для АС-120/27,  $I_{\text{доп}}=390 \text{ А}$ .

Таблица 9.

Линия	А-10	А-14	А-12	12-4
$I_{P,i}, \text{ А}$	87,47	56,13	135,79	62,17
Марка	АС-120/27	АС-120/27	АС-150/27	АС-120/27
$I_{\text{авар},i}, \text{ А}$	174,9	112,21	271,51	124,29
$I_{\text{доп},i}, \text{ А}$	390	390	450	390

### Вариант №2

Для расчёта перетоков мощности в «кольце», разрезаю цепь в точка питания А, преобразовывая цепь с двухсторонним питанием:

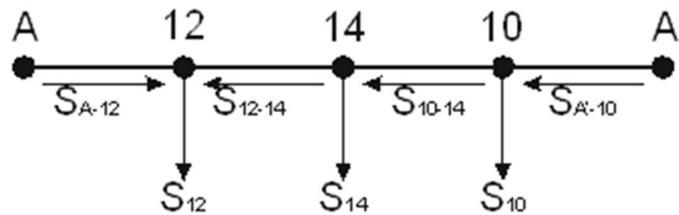


Рисунок 7. Разрез кольца в точке А

$$S_{A-12} = \frac{S_{12}(L_{12-14} + L_{10-14} + L_{A'-10}) + S_{14}(L_{10-14} + L_{A'-10}) + S_{10}(L_{A'-10})}{\sum L},$$

$$S_{A-12} = \frac{33.41(27 + 68.4 + 36) + 25.45(68.4 + 36) + 39.67 * 36}{171}$$

$$= 49.56 \text{MBA},$$

$$S_{A'-10} = \frac{S_{10}(L_{10-14} + L_{12-14} + L_{A-12}) + S_{14}(L_{12-14} + L_{A-12}) + S_{12}(L_{A-12})}{\sum L},$$

$$S_{A'-10} = \frac{39.67(68,4 + 27 + 39,6) + 25.45(27 + 39,6) + 33.41 * 39,6}{171}$$

$$= 48,97 \text{MBA}$$

$$S_{10-14} = \frac{S_{14}(L_{12-14} + L_{A-12}) - S_{10}(L_{A'-10}) + S_{12}(L_{A-12})}{\sum L},$$

$$S_{10-14} = \frac{25,45(27 + 39,6) - 39,67 * 36 + 33,41 * 39,6}{171} = 9,3 \text{ MBA},$$

$$S_{14-12} = S_{10-14} + S_{12} = 47,24 + 33,41 = 42,7 \text{ MBA},$$

$$S_{A-4} = \frac{S_4}{2} = \frac{28,19}{2} = 14.1 \text{ MBA},$$

$$I_{PA-12} = \frac{S_{A-12}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{49,56 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 218.5 \text{ A},$$

$$I_{PA-10} = \frac{S_{A-10}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{48,97 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 215,89 \text{ A},$$

$$I_{P10-14} = \frac{S_{10-14}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{9,3 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 41 \text{ A},$$

$$I_{P14-12} = \frac{S_{14-12}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{39,67 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 188,3 \text{ A},$$

$$I_{PA-4} = \frac{S_{A-4}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{12,73 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 62,14 \text{ A},$$

$$F_{A-12} = \frac{I_{P,A-12}}{J} = \frac{218,5}{1.1} = 198,65 \text{ мм}^2$$

$$F_{A-10} = \frac{I_{P,A-10}}{J} = \frac{215.89}{1.1} = 196.27 \text{ мм}^2$$

$$F_{10-14} = \frac{I_{P,A-12}}{J} = \frac{41}{1.1} = 37.27 \text{ мм}^2$$

$$F_{14-12} = \frac{I_{P,A-12}}{J} = \frac{188.3}{1.1} = 171.17 \text{ мм}^2$$

$$F_{A-4} = \frac{I_{P,A-12}}{J} = \frac{62.14}{1.1} = 56.5 \text{ мм}^2$$

Таблица 10.

Предварительный выбор проводников, с учётом района по гололёду IV		
Линия	Марка проводника	Допустимы ток, А
A-12	АС-240/39	610
A-10	АС-240/39	610
10-14	АС-120/27	390
14-12	АС-185/29	510
A-4	АС-120/27	390

По условию  $I_{\text{авар}} < I_{\text{доп}}$ , произвожу расчёт в послеаварийном режиме.

$$S_{\text{авар},A-4} = S_4 = 28,19 \text{ МВА}$$

Расчёт рабочих токов участка «кольцо» при потере линии A-12.

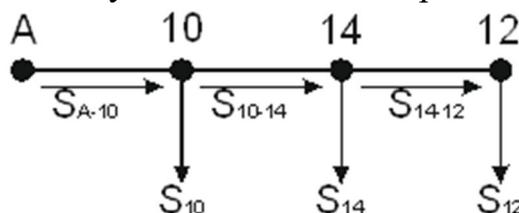


Рисунок 7. Потеря линии A-12

$$S_{\text{авар},A-10} = S_{10} + S_{14} + S_{12} = 39.67 + 25.45 + 33.41 = 98,53 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{авар},10-14} = S_{14} + S_{12} = 25.45 + 33.41 = 58,86 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{авар},14-12} = S_{12} = 33.41 \text{ МВА}$$

Расчёт рабочих токов участка «кольцо» при потере линии A-10.

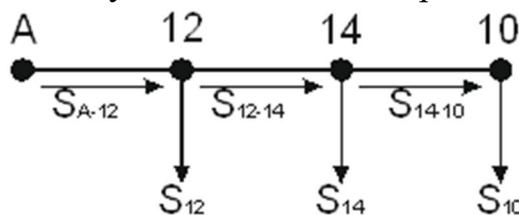


Рисунок 7. Потеря линии A-10

$$S_{\text{авар},A-12} = S_{12} + S_{14} + S_{10} = 33.41 + 25.45 + 39,67 = 98,53 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{авар},12-14} = S_{14} + S_{10} = 25.45 + 39,67 = 84,31 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{авар},14-10} = S_{10} = 39,67 \text{ МВА}$$

Принимаю наибольшие мощности, протекающие в сети, в обоих случаях:

$$S_{\text{авар},A-4} = 28,19 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{авар,А-10}} = 98,53 \text{ МВА,}$$

$$S_{\text{авар,А-12}} = 98,53 \text{ МВА,}$$

$$S_{\text{авар,10-14}} = 39.67 \text{ МВА,}$$

$$S_{\text{авар,12-14}} = 84.31 \text{ МВА}$$

$$I_{\text{авар,А-4}} = \frac{S_{\text{авар,А-4}}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{28,19 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 124,29 \text{ А}$$

$$I_{\text{авар,А-10}} = \frac{S_{\text{авар,А-4}}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{98.53 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 434.4 \text{ А}$$

$$I_{\text{авар,А-12}} = \frac{S_{\text{авар,А-4}}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{98.53 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 434.4 \text{ А}$$

$$I_{\text{авар,10-14}} = \frac{S_{\text{авар,А-4}}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{39.67 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 174.9 \text{ А}$$

$$I_{\text{авар,12-14}} = \frac{S_{\text{авар,А-4}}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}} * \alpha_i \alpha_t = \frac{84.31 * 10^6}{\sqrt{3} * 110 * 10^3} * 1.05 * 0.8 = 371,7 \text{ А}$$

Таким образом, рабочие токи в послеаварийных режимах не превышают допустимых токов выбранных проводников.

Таблица 11.

Линия	А-12	А-10	10-14	14-12	А-4
$I_{P,i}, \text{ А}$	218,5	215,89	41	188,3	56,1
Марка	АС-240/39	АС-240/39	АС-120/27	АС-185/29	АС-120/27
$I_{\text{авар},i}, \text{ А}$	434,4	434,4	174,9	371,7	124,29
$I_{\text{доп},i}, \text{ А}$	610	610	390	510	390

Таблица 15.

Расчётные данные ВЛ			
Марка	$r_0, \text{ Ом/км}$	$x_0, \text{ Ом/км}$	$b_0, \text{ см/км } 10^{-6}$
АС-120/27	0,244	0,427	2,565
АС-150/27	0,204	0,420	2,611
АС-185/29	0,159	0,413	2,645
АС-240/39	0,118	0,405	2,702

## 7. Выбор схем распределительных устройств

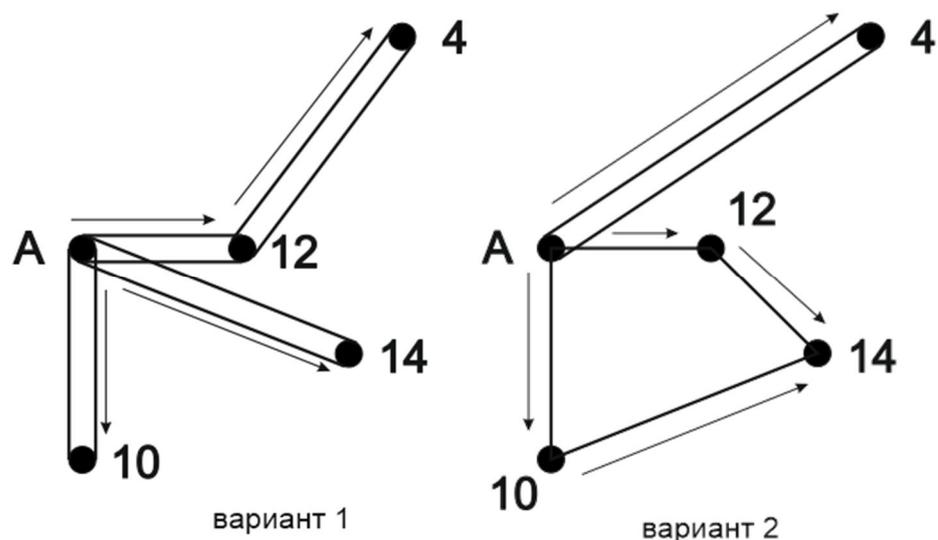


Рисунок 8. Варианты распределительной сети

Для варианта 1, в качестве РУ на стороне ВН узловой подстанции 12, принимаю схему «одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин» (рис. 9), тупиковых подстанций 4, 10, 14 – «два блока линия-трансформатор с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий» (рис. 10, а)).

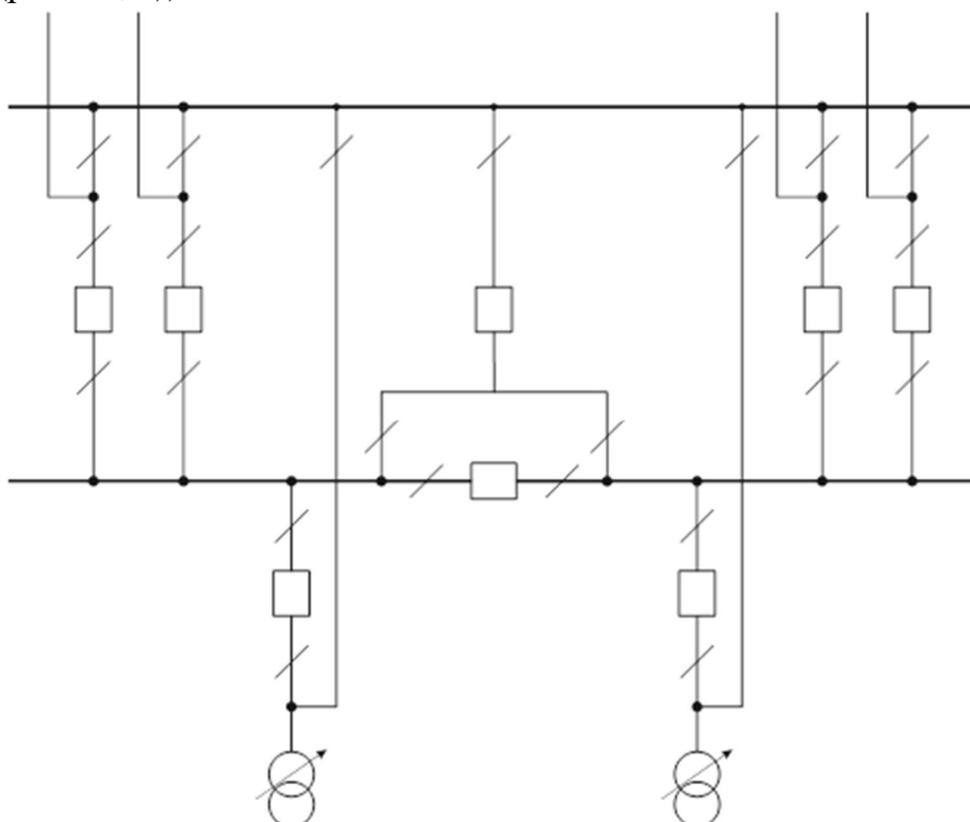


Рисунок 9. Схема «12»

Для варианта 2, на стороне ВН тупиковой подстанции 4, принимаю схему «два блока линия-трансформатор с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий» (рис. 10, а)), проходных подстанций 10,12,14 «мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий» (рис. 10, б)).

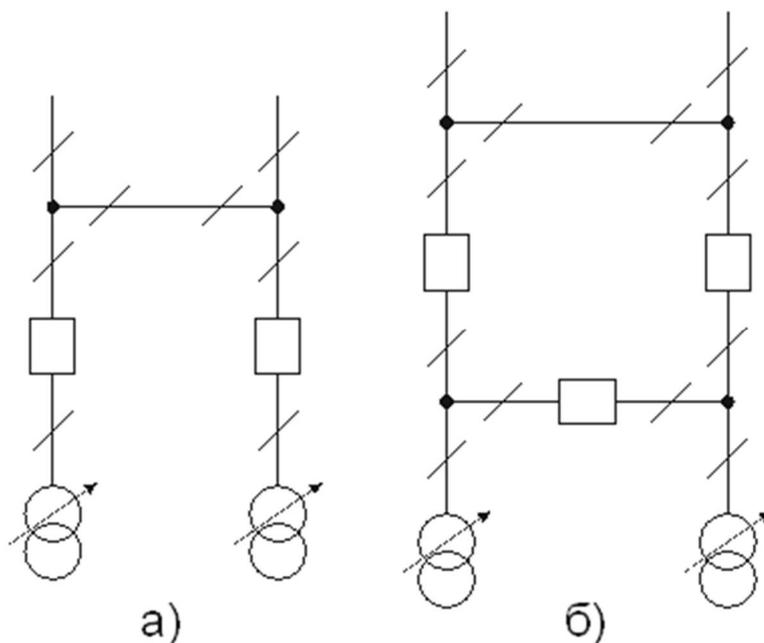


Рисунок 10. Схемы «4Н» и «5Н».

Для пункта питания А обоих вариантов, принимаю схему «две рабочие и обходная системы шин» (рис. 11).

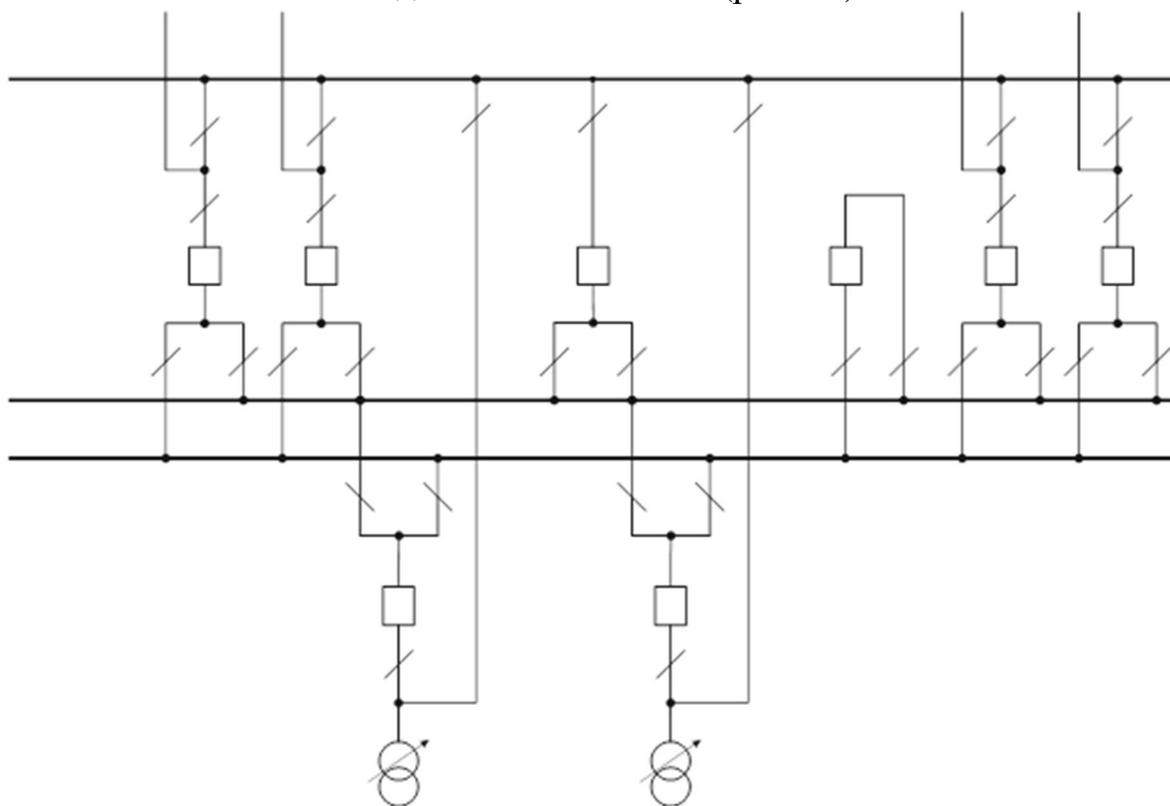


Рисунок 11. Схема «13Н»

Для схем РУ НН для обоих вариантов принимаю схему «две секционированные выключателями системы шин» (рис.12).

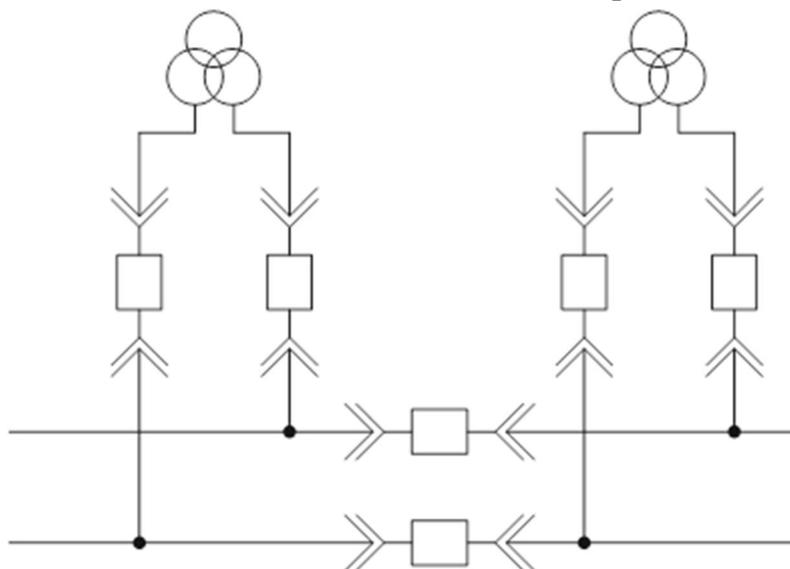


Рисунок 12. Две секционированные выключателями системы шин

## 8. Техничко-экономическое сравнение вариантов РЭС

Обоснование решений при проектировании электрической сети осуществляется на основе технико-экономического сопоставления вариантов схем и параметров сети путем оценки их сравнительной эффективности и производится по минимальному сроку окупаемости при условии, что сравниваемые варианты обеспечивают одинаковый энергетический эффект.

Произвожу расчёт для варианта 1.

Определяю капитальные вложения на сооружение воздушных линий электропередачи по формуле:

$$K = L * K_0 * K_{\text{перерасч}} \quad (6)$$

где  $K_{\text{перерасч}}$  – коэффициент индексации цен,  $K_{\text{перерасч}} = 6$ ;

$K_0$  – базисные показатели стоимости ВЛ 35-1150 кВ переменного тока на стальных и ЖБ опорах [4, табл. 7], для двух цепных линий, с ж/б опорами, сечением проводников до 150 мм<sup>2</sup>, напряжением 110 кВ,:

$$K_0 = 1150 \text{ тыс. руб./км.}$$

$$K_{A-12} = 2 * 72 * 1150 * 10^3 * 6 = 9.94 * 10^8 \text{ руб.}$$

$$K_{A-14} = 2 * 115.2 * 1150 * 10^3 * 6 = 15.9 * 10^8 \text{ руб.}$$

$$K_{A-10} = 2 * 72 * 1150 * 10^3 * 6 = 9.94 * 10^8 \text{ руб.}$$

$$K_{12-4} = 2 * 68.4 * 1150 * 10^3 * 6 = 9.44 * 10^8 \text{ руб.}$$

$$\sum K_{\text{ЛЭП}} = (9.94 + 15.9 + 9.94 + 9.44) * 10^8 = 45.2 * 10^8 \text{ руб.}$$

Определяю стоимость капитальных вложений в строительство ПС 110/10 кВ.

Стоимость Трансформаторов определяю, используя [4, табл 7.20]:

$$K_T = K_{\text{перерасч}} \sum K_{T,i}$$

Таблица 12.

Узел	Марка	Стоимость ячейки трансформаторов 35-220 кВ, тыс. руб.
4,10,12	ТРДН-40000/110	7300
14	ТРДН-25000/110	5500

$$K_T = 6 * (7300 * 3 + 5500) * 10^3 = 274.4 * 10^6 \text{ руб.}$$

Ориентировочно определяю стоимость компенсирующих устройств:

Таблица 13.

Марка	Стоимость, тыс. руб.	Количество	Итоговая стоимость, тыс. руб.
УКРМ-10,5/3250	1530,4	4	6121,6
УКРМ-10,5/4050	4500	8	36000
УКРМ-10,5/2000	1290	4	5160
В сумме			47281,6

Стоимость РУ ВН [4, табл. 7.18, 7.19] с элегазовыми выключателями, стоимость постоянной части затрат по ПС 110/10 кВ [4, табл. 7.30].

Таблица 14.

Наименование РУ	Стоимость тыс. руб.	Пост-я часть затрат, тыс. руб.	Узел	Всего, тыс. руб.
РУ-110 кВ. Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий	15200*6=91200	9000*6=54000	4,10, 14	435600
РУ 110 кВ. Одна рабочая, секционированная выключателем и обходная система шин	7300*6*6=262800	12250*6=73500	12	336300
РУ-110 кВ. Две рабочие и обходная системы шин	7300*8*6=350400	12250*6=73500	А	423900

В сумме:  $K_{рувн} = 1.196 * 10^6$  руб.

Стоимость РУ НН [4, табл. 7.19] с вакуумными выключателями. На каждой из ПС с трансформаторами ТРДН должны быть предусмотрены: четыре вводные ячейки, одна с секционным выключателем, одна с секционным разъединителем, четыре ячейки с трансформаторами напряжения и две ячейки для подключения трансформаторов собственных нужд. Кроме того, в РУ 10 кВ должны быть ячейки отходящих линий для электроснабжения потребителей и подключения конденсаторных установок. Принимаю, что на каждой секции НН (10 кВ) будет по четыре отходящие линии.

Стоимость 28 ячеек РУ НН для каждой ПС определим, используя [4, табл. 7.19] для вакуумных выключателей:

$$K_{рунн} = 6 * (160 * 10^3 * 28 * 4) = 1,0752 * 10^8 \text{руб.}$$

Таким образом, вложения в распределительные устройства составляет:

$$K_{ру} = 1.196 * 10^6 + 1,0752 * 10^8 = 1.087 * 10^8 \text{руб.}$$

Итоговые капитальные затраты на строительство электрической сети 110/10 кВ определяются по формуле:

$$K = K_{лэп} + K_{тр} + K_{ку} + K_{ру}$$

$$K_1 = 45.2 * 10^8 + 274.4 * 10^6 + 47281.6 * 10^3 + 1.087 * 10^8 = 4.95 * 10^9 \text{руб.}$$

Расчёт суммарных годовых потерь электроэнергии.

По [1] потери электрической энергии в трансформаторе определяются формулой:

$$\Delta W_{Ti} = \Delta P_{xx,i} * 8760 + \Delta P_{кз,i} * \left( \frac{S_{пс,i}}{S_{ном.тр}} \right)^2 * \left( 0,124 * \frac{T_{MAX}}{1000} \right)^2 * 87600$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{T4} &= 0.027 * 8760 + 0.12 * \left( \frac{28.19}{25} \right)^2 * \left( 0,124 * \frac{3600}{10000} \right)^2 * 87600 \\ &= 549.6 \text{МВА} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{T4} &= 0.036 * 8760 + 0.172 * \left( \frac{36.67}{25} \right)^2 * \left( 0,124 * \frac{3600}{10000} \right)^2 * 87600 \\ &= 662.52 \text{МВА} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{T4} &= 0.036 * 8760 + 0.172 * \left( \frac{33.41}{25} \right)^2 * \left( 0,124 * \frac{3600}{10000} \right)^2 * 87600 \\ &= 561.6 \text{МВА} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{T4} &= 0.036 * 8760 + 0.172 * \left( \frac{25.45}{25} \right)^2 * \left( 0,124 * \frac{3600}{10000} \right)^2 * 87600 \\ &= 458.2 \text{МВА} \end{aligned}$$

$$\Delta W_T = 2 * (\Delta W_{T4} + \Delta W_{T4} + \Delta W_{T4} + \Delta W_{T4}) = 4463.92 \text{ МВА}$$

Определяю потери электрической энергии в линиях электропередач.

Для кольца:

$$\Delta W_{\text{ЛЭП},i} = \left( \frac{S_{\text{ЛЭП},i}}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 * R_{\text{ЛЭП},i} * \left( 0,124 + \frac{T_{\text{МАХ}}}{10000} \right)^2 * 8760$$

Для радиальной схемы:

$$\Delta W_{\text{ЛЭП},i} = \left( \frac{S_{\text{ЛЭП},i}}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 * \frac{R_{\text{ЛЭП},i}}{2} * \left( 0,124 + \frac{T_{\text{МАХ}}}{10000} \right)^2 * 8760$$

где  $R_{\text{ЛЭП},i} = r_i/l_i$ .

$$\Delta W_{\text{ЛЭП},A-12} = \left( \frac{30,8}{110} \right)^2 * \frac{0,204 * 72}{2} * \left( 0,124 + \frac{3600}{10000} \right)^2 * 8760 = 1181.53 \text{ МВт} * \text{ч}$$

$$\Delta W_{\text{ЛЭП},A-14} = \left( \frac{12,73}{110} \right)^2 * \frac{0,244 * 115,2}{2} * \left( 0,124 + \frac{3600}{10000} \right)^2 * 8760$$

$$= 364.72 \text{ МВт} * \text{ч}$$

$$\Delta W_{\text{ЛЭП},A-10} = \left( \frac{19,84}{110} \right)^2 * \frac{0,244 * 72}{2} * \left( 0,124 + \frac{3600}{10000} \right)^2 * 8760$$

$$= 586.39 \text{ МВт} * \text{ч}$$

$$\Delta W_{\text{ЛЭП},12-4} = \left( \frac{14,1}{110} \right)^2 * \frac{0,244 * 68,4}{2} * \left( 0,124 + \frac{3600}{10000} \right)^2 * 8760 = 281.36 \text{ МВт} * \text{ч}$$

$$\sum \Delta W_{\text{ЛЭП}} = 1181.53 + 364.72 + 586.39 + 281.36 = 2414 \text{ МВт} * \text{ч}$$

Стоимость электроэнергии на сегодняшний день составляет 3,25 руб/кВт·ч. Стоимость потерь электроэнергии определяется по формуле:

$$I_{\Delta W} = 3.25 * (\Delta W_{\text{ЛЭП}} + \Delta W_{\text{ТР}})$$

$$I_{\Delta W1} = 3.25 * (2414 + 4463.92) = 6877.92 \text{ руб./год}$$

Аналогичным образом произвожу расчёт для варианта 2.

$$K = L * K_0 * K_{\text{перерасч}}$$

$K_0$  – базисные показатели стоимости ВЛ 35-1150 кВ переменного тока на стальных и ЖБ опорах [4, табл. 7], для одно цепных линий, с ж/б опорами, сечением проводников до 150 мм<sup>2</sup>, напряжением 110 кВ,:

$$K_0 = 850 \text{ тыс. руб./км.}$$

$$K_{A-4} = 2 * 136,8 * 1150 * 10^3 * 6 = 3,15 * 10^8 \text{ руб.}$$

$$K_{A-12} = 39,6 * 850 * 10^3 * 6 = 0,34 * 10^8 \text{ руб.}$$

$$K_{A-10} = 36 * 850 * 10^3 * 6 = 0,23 * 10^8 \text{ руб.}$$

$$K_{A-14} = 27 * 850 * 10^3 * 6 = 0,58 * 10^8 \text{ руб.}$$

$$K_{14-10} = 68,4 * 850 * 10^3 * 6 = 0,31 * 10^8 \text{ руб.}$$

$$\sum K_{\text{ЛЭП}} = (3,15 + 0,34 + 0,23 + 0,58 + 0,31) * 10^8 = 4.6 * 10^8 \text{ руб.}$$

Стоимость Трансформаторов:

$$K_{\text{T}} = 6 * (7300 * 3 + 5500) * 10^3 = 274.4 * 10^6 \text{ руб.}$$

Ориентировочная стоимость компенсирующих устройств:

$$K_{\text{КУ}} = 47281,6 * 10^3 \text{ руб.}$$

Стоимость РУ ВН [4, табл. 7.18, 7.19] с элегазовыми выключателями, стоимость постоянной части затрат по ПС 110/10 кВ [4, табл. 7.30].

Таблица 15.

Наименование РУ	Стоимость тыс. руб.	Пост-я часть затрат, тыс. руб.	Узел	Всего, тыс. руб.
РУ–110 кВ. Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий	15200*6=91200	9000*6=54000	4	145200
РУ–110 кВ. Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий	30000*6=180000	9000*6=54000	12, 10, 14	702000
РУ-110 кВ. Две рабочие и обходная системы шин	7300*6*6=262800	12250*6=73500	А	336300

В сумме:  $K_{\text{РУВН}} = 1,18 * 10^9 \text{ руб.}$

Стоимость 28 ячеек РУ НН для каждой ПС определим, используя [4, табл. 7.19] для вакуумных выключателей:

$$K_{\text{РУНН}} = 6 * (160 * 10^3 * 28 * 4) = 1,0752 * 10^8 \text{ руб.}$$

Таким образом, вложения в распределительные устройства составляет:

$$K_{\text{РУ}} = 1,18 * 10^9 + 1,0752 * 10^8 = 1.29 * 10^9 \text{ руб.}$$

Итоговые капитальные затраты на строительство электрической сети 110/10 кВ определяются по формуле:

$$K = K_{\text{ЛЭП}} + K_{\text{ТР}} + K_{\text{КУ}} + K_{\text{РУ}}$$

$$K_2 = 4.6 * 10^8 + 274.4 * 10^6 + 47281.6 * 10^3 + 1.29 * 10^9 = 2.072 * 10^9 \text{ руб.}$$

Расчёт суммарных годовых потерь электроэнергии.

Потери электрической энергии в трансформаторах:

$$\Delta W_{\text{T4}} = 549.6 \text{ МВА}$$

$$\Delta W_{\text{T4}} = 662.52 \text{ МВА}$$

$$\Delta W_{T4} = 561.6 \text{ МВА}$$

$$\Delta W_{T4} = 458.2 \text{ МВА}$$

$$\Delta W_T = 2 * (\Delta W_{T4} + \Delta W_{T4} + \Delta W_{T4} + \Delta W_{T4}) = 4463.92 \text{ МВА}$$

Потери электрической энергии в линиях электропередач:

Для кольца:

$$\Delta W_{\text{ЛЭП},i} = \left( \frac{S_{\text{ЛЭП},i}}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 * R_{\text{ЛЭП},i} * \left( 0,124 + \frac{T_{\text{МАХ}}}{10000} \right)^2 * 8760$$

Для радиальной схемы:

$$\Delta W_{\text{ЛЭП},i} = \left( \frac{S_{\text{ЛЭП},i}}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 * \frac{R_{\text{ЛЭП},i}}{2} * \left( 0,124 + \frac{T_{\text{МАХ}}}{10000} \right)^2 * 8760$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{ЛЭП},A-4} &= \left( \frac{12.73}{110} \right)^2 * \frac{0.244 * 136,8}{2} * \left( 0,124 + \frac{3600}{10000} \right)^2 * 8760 \\ &= 458.7 \text{ МВт} * \text{ч} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{ЛЭП},A-12} &= \left( \frac{49.56}{110} \right)^2 * (0,118 * 39,6) * \left( 0,124 + \frac{3600}{10000} \right)^2 * 8760 \\ &= 973.2 \text{ МВт} * \text{ч} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{ЛЭП},A-10} &= \left( \frac{48.97}{110} \right)^2 * (0,118 * 36) * \left( 0,124 + \frac{3600}{10000} \right)^2 * 8760 \\ &= 863.8 \text{ МВт} * \text{ч} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{ЛЭП},10-14} &= \left( \frac{9.3}{110} \right)^2 * (0,244 * 68,4) * \left( 0,124 + \frac{3600}{10000} \right)^2 * 8760 \\ &= 122.4 \text{ МВт} * \text{ч} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{ЛЭП},14-12} &= \left( \frac{42.7}{110} \right)^2 * (0,159 * 27) * \left( 0,124 + \frac{3600}{10000} \right)^2 * 8760 \\ &= 663.7 \text{ МВт} * \text{ч} \end{aligned}$$

$$\sum \Delta W_{\text{ЛЭП}} = 458.7 + 973.2 + 863.8 + 122.4 + 663.7 = 3081.8 \text{ МВт} * \text{ч}$$

Стоимость потерь электроэнергии:

$$I_{\Delta W} = 3.25 * (\Delta W_{\text{ЛЭП}} + \Delta W_{\text{ТР}})$$

$$I_{\Delta W2} = 3.25 * (3081,8 + 4463.92) = 7545,7 \text{ руб./год}$$

Сравниваю экономическую эффективность обоих вариантов.

Объём реализованной продукции:

$$Q_P = T_{\text{МАХ}} * \sum P * 2.43$$

$$Q_P = 3600 * (27 + 38 + 32 + 24) * 10^6 * 2,43 = 1.059 * 10^9 \text{ руб}$$

Издержки на амортизацию, ремонт и обслуживание определяются по формуле:

$$I_{\text{АРО}} = K * \alpha, \text{ где } \alpha = 2,8\%$$

$$I_{\text{АРО}1} = 4.95 * 10^9 * 0,028 = 0.139 * 10^9 \text{ руб/год.}$$

$$I_{\text{АРО}2} = 2.072 * 10^9 * 0,028 = 0.058 * 10^9 \text{ руб./год.}$$

Стоимость потерь электроэнергии:

$$I_{\Delta W1} = 6877.92 * 10^6 \text{ руб./год}$$

$$I_{\Delta W2} = 7545,7 * 10^6 \text{ руб./год}$$

Суммарные издержки определяем по формуле:  $I_{\Sigma} = I_{\text{АРО}} + I_{\Delta W}$

$$I_{\Sigma1} = 0.139 * 10^9 + 6877.92 = 0.139 * 10^9 \text{ руб./год}$$

$$I_{\Sigma2} = 0.058 * 10^9 + 7545,7 = 0.058 * 10^9 \text{ руб./год}$$

Определяю прибыль как:  $\Pi = Q_P - I_{\Sigma}$

$$\Pi_1 = 1,109 * 10^9 - 0.139 * 10^9 = 0.97 * 10^9 \text{ руб./год}$$

$$\Pi_2 = 1,109 * 10^9 - 0.058 * 10^9 = 1,051 * 10^9 \text{ руб./год}$$

Налог на прибыль принимаю 20 %:

$$H_1 = 0,2 * \Pi_1 = 0,2 * 0,97 * 10^9 = 1.94 * 10^8 \text{ руб./год}$$

$$H_2 = 0,2 * \Pi_2 = 0,2 * 1,051 * 10^9 = 2.102 * 10^8 \text{ руб./год}$$

Рентабельности сети вычисляю по формуле:

$$P = \frac{Q_P - I_{\Sigma} - H}{K}$$

$$P_1 = \frac{1.059 * 10^9 - 0.139 * 10^9 - 1.94 * 10^8}{4.95 * 10^9} = 0.147$$

$$P_2 = \frac{1.059 * 10^9 - 0.058 * 10^9 - 2.102 * 10^8}{2.072 * 10^9} = 0.382$$

Определяю срок окупаемости по формуле:

$$T_{\text{OK}i} = \frac{K_i}{\Pi_i + I_{\Sigma i}}$$

$$T_{\text{OK}1} = \frac{K_1}{\Pi_1 + I_{\Sigma1}} = \frac{4.95 * 10^9}{0.97 * 10^9 + 0.139 * 10^9} = 4.4 \text{ лет}$$

$$T_{\text{OK}2} = \frac{K_2}{\Pi_2 + I_{\Sigma2}} = \frac{2.072 * 10^9}{1,051 * 10^9 + 0.058 * 10^9} = 1.87 \text{ года}$$

Таким образом, вариант 2 обладает большим преимуществом перед первым как по показателям прибыли, так и по показателям окупаемости сети. Дальнейшие расчёты буду вести по второму варианту сети.

## 9. Расчет режимов сети

### 9.1. Максимальный режим

#### 9.1.1. Определение расчетной нагрузки ПС и расчет потерь в трансформаторах

Определение расчетной нагрузки узлов (ПС) предшествует расчету режимов РЭС. Напряжение в сети принимается равным номинальному. Расчетная нагрузка ПС определяется по формуле:

$$S_{\text{расч},i} = S_{\text{н},i} + \Delta S_i - j(Q_c^{\text{H}} + Q_c^{\text{K}}), \quad (7)$$

где  $S_{\text{расч},i}$  – нагрузка  $i$ -й ПС с учётом компенсации реактивной мощности МВА;  $\Delta S_i$  – потери полной мощности в трансформаторе МВА,  $Q_c^{\text{H}}, Q_c^{\text{K}}$  – генерируемые реактивные мощности линий, подходящих к узлу, МВАр.

Ёмкостные мощности линий определяются как:

$$Q_c^{\text{H}} = \frac{1}{2} U_{\text{ном}}^2 b \quad (8)$$

$$Q_c^{\text{K}} = \frac{1}{2} U_{\text{ном}}^2 b \quad (9)$$

где  $b$  – ёмкостная проводимость линий.

Для одноцепных линий ёмкостная проводимость определяется как:

$$b_i = b_0 L_i \quad (10)$$

где  $b_0$  – удельная ёмкостная проводимость линии (выбирается по [4, табл. 7.5], исходя из марки провода), См/км;  $L_i$  – длина линии, км.

Для параллельных линий:

$$b_i = 2b_0 L_i$$

Потери мощности холостого хода и короткого замыкания трансформаторов:

$$\Delta P_i = \Delta P_{X,i} + \frac{\Delta P_{K,i} S_i^2}{S_{\text{ном}}^2} \quad (11)$$

$$\Delta Q_i = \frac{I_{X\%,i} S_{\text{ном}}}{100} + \frac{U_{K\%} S_i^2}{100 * S_{\text{ном}}} \quad (12)$$

где  $S_i$  – реальная загрузка одного трансформатора  $i$ -й ПС;

Потери полной мощности в трансформаторе определяются по формуле:

$$\Delta S_i = \Delta P_i + j\Delta Q_i$$

$$\Delta P_4 = \Delta P_{X4} + \frac{\Delta P_{K4} (S_4 / 2)^2}{S_{\text{ном4}}^2} = 36 * 10^3 + \frac{172 * 10^3 * \left(\frac{28.19 * 10^6}{2}\right)^2}{(40 * 10^6)^2} = 0.057 \text{ МВт}$$

$$\Delta P_{10} = \Delta P_{X10} + \frac{\Delta P_{K10} (S_4 / 2)^2}{S_{\text{НОМ}10}^2} = 36 * 10^3 + \frac{172 * 10^3 * \left(\frac{39.67 * 10^6}{2}\right)^2}{(40 * 10^6)^2}$$

$$= 0,078 \text{ МВт}$$

$$\Delta P_{12} = \Delta P_{X12} + \frac{\Delta P_{K12} (S_4 / 2)^2}{S_{\text{НОМ}12}^2} = 36 * 10^3 + \frac{172 * 10^3 * \left(\frac{33.41 * 10^6}{2}\right)^2}{(40 * 10^6)^2}$$

$$= 0,066 \text{ МВт}$$

$$\Delta P_{14} = \Delta P_{X14} + \frac{\Delta P_{K14} (S_{14} / 2)^2}{S_{\text{НОМ}14}^2} = 27 * 10^3 + \frac{120 * 10^3 * \left(\frac{25.45 * 10^6}{2}\right)^2}{(25 * 10^6)^2}$$

$$= 0,058 \text{ МВт}$$

$$\Delta Q_4 = \frac{I_{X\%,4} S_{\text{НОМ}4}}{100} + \frac{U_{K\%} S_4^2}{100 * S_{\text{НОМ}4}} = \frac{0.7 * 40 * 10^6}{100} + \frac{10.5 * (28.19 * 10^6)^2}{100 * 40 * 10^6}$$

$$= 2.34 \text{ МВар}$$

$$\Delta Q_{10} = \frac{I_{X\%,10} S_{\text{НОМ}10}}{100} + \frac{U_{K\%} S_{10}^2}{100 * S_{\text{НОМ}10}} = \frac{0.7 * 40 * 10^6}{100} + \frac{10.5 * (39.67 * 10^6)^2}{100 * 40 * 10^6}$$

$$= 4,34 \text{ МВар}$$

$$\Delta Q_{12} = \frac{I_{X\%,12} S_{\text{НОМ}12}}{100} + \frac{U_{K\%} S_{12}^2}{100 * S_{\text{НОМ}12}} = \frac{0.7 * 40 * 10^6}{100} + \frac{10.5 * (33,41 * 10^6)^2}{100 * 40 * 10^6}$$

$$= 3,19 \text{ МВар}$$

$$\Delta Q_{14} = \frac{I_{X\%,14} S_{\text{НОМ}14}}{100} + \frac{U_{K\%} S_{14}^2}{100 * S_{\text{НОМ}14}} = \frac{0.7 * 40 * 10^6}{100} + \frac{10.5 * (25,45 * 10^6)^2}{100 * 40 * 10^6}$$

$$= 2,9 \text{ МВар}$$

$$\Delta S_4 = 0.057 + j2.34 \text{ МВА}$$

$$\Delta S_{10} = 0,078 + j4.34 \text{ МВА}$$

$$\Delta S_{12} = 0,066 + j3,19 \text{ МВА}$$

$$\Delta S_{14} = 0,058 + j2,9 \text{ МВА}$$

Определяю расчётные нагрузки по каждому трансформатору соответствующих подстанций:

$$S_{\text{расч},i} = S_{\text{Н},i} + \Delta S_i - jQ_{\text{С},i}^{\text{H}}$$

Для этого предварительно рассчитываю зарядные мощности  $jQ_{\text{С},i}^{\text{H}}$ :

$$Q_{\text{С},i}^{\text{H}} = \frac{1}{2} U_{\text{НОМ}}^2 * 2b_{0,i} L_i$$

$$Q_{\text{С},A-4}^{\text{H}} = \frac{1}{2} U_{\text{НОМ}}^2 * 2b_{0,A-4} L_{A-4} = \frac{1}{2} * 110^2 * 2 * (2.611 * 10^{-6}) * 136.8 = 4.32 \text{ МВар}$$

$$Q_{\text{С},A-12}^{\text{H}} = \frac{1}{2} U_{\text{НОМ}}^2 * 2b_{0,A-12} L_{A-12} = \frac{1}{2} * 110^2 * 2 * (2.702 * 10^{-6}) * 39,6 = 1,3 \text{ МВар}$$

$$Q_{\text{С},A-10}^{\text{H}} = \frac{1}{2} U_{\text{НОМ}}^2 * 2b_{0,A-10} L_{A-10} = \frac{1}{2} * 110^2 * 2 * (2.702 * 10^{-6}) * 36 = 1,18 \text{ МВар}$$

$$Q_{C,12-14}^H = \frac{1}{2} U_{НОМ}^2 * 2b_{0,12-14} L_{12-14} = \frac{1}{2} * 110^2 * 2 * (2.611 * 10^{-6}) * 27 = 0,83 \text{ МВАр}$$

$$Q_{C,14-10}^H = \frac{1}{2} U_{НОМ}^2 * 2b_{0,14-10} L_{14-10} = \frac{1}{2} * 110^2 * 2 * (2.645 * 10^{-6}) * 68,4 = 2,2 \text{ МВАр}$$

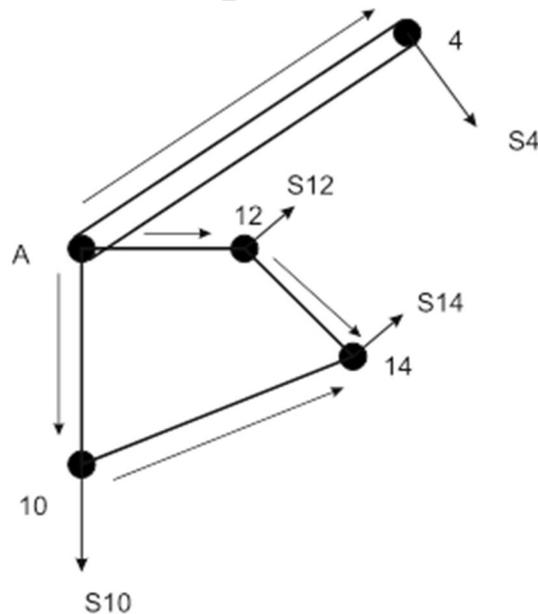


Рисунок 13. Перетоки мощностей

$$S_{\text{расч},4} = S_{Н,4} + \Delta S_4 - jQ_{C,4}^H = (27 + j8,1) + (0.057 + j2.34) - j4.32 = 27.057 + j6.12 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{расч},10} = S_{Н,10} + \Delta S_{10} - j(Q_{C,A-10}^K + Q_{C,14-10}^H) = (38 + j11.4) + (0.078 + j4.34) - j(1.18 + 2.2) = 38.078 + j12.36 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{расч},14} = S_{Н,14} + \Delta S_{14} - j(Q_{C,10-14}^K + Q_{C,12-14}^K) = (24 + j8,4) + (0.058 + j2.9) - j(2.2 + 0.83) = 24.058 + j8.27 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{расч},12} = S_{Н,12} + \Delta S_{12} - j(Q_{C,A-12}^K + Q_{C,12-14}^H) = (32 + j9.6) + (0.066 + j3.19) - j(1.3 + 0.83) = 32.066 + j10.66 \text{ МВА}$$

## 9.2. Расчет перетоков мощностей с учетом потерь в линии

Определяю полные сопротивления линий:

Таблица 16

Линия	Марка	$Z_{л} = (r_0 + jx_0)L_{л}, \text{ Ом}$
A-4	АС-120	$Z_{A-4} = (0.244 + j0.427) * 136.8 = 33.78 + j58.4 \text{ Ом}$
A-12	АС-240	$Z_{A-12} = (0.118 + j0.405) * 39.6 = 4.67 + j16.04 \text{ Ом}$
A-10	АС-240	$Z_{A-10} = (0.118 + j0.405) * 36 = 0.65 + j14.58 \text{ Ом}$
10-14	АС-120	$Z_{10-14} = (0.244 + j0.427) * 68.4 = 16.69 + j29.2 \text{ Ом}$
14-12	АС-185	$Z_{14-12} = (0.159 + j0.413) * 27 = 4.29 + j11.15 \text{ Ом}$

Для начала рассчитываю участок «кольцо» А,12,14,10.

На первом этапе определяю перетоки мощности без учёта потерь мощности.

$$S_{A-12} = \frac{S_{12}(Z_{12-14}^* + Z_{10-14}^* + Z_{A'-10}^*) + S_{14}(Z_{10-14}^* + Z_{A'-10}^*) + S_{10}(Z_{A'-10}^*)}{\sum Z^*}$$

$$S_{A-12} = \frac{33.8e^{j0.22}(11.9e^{-j1.2} + 33.6e^{-j1.05} + 14.6e^{-j1.5}) + 25.4e^{j0.3}(33.6e^{-j1.05} + 14.6e^{-j1.5}) + 40e^{j0.3} * 14.6e^{-j1.5}}{142e^{j1.13}} =$$

$$= 26.3e^{j0.22} = 25.7 + j5.64 \text{ МВА},$$

$$S_{A'-10} = \frac{S_{10}(Z_{10-14}^* + Z_{12-14}^* + Z_{A-12}^*) + S_{14}(Z_{12-14}^* + Z_{A-12}^*) + S_{12}(Z_{A-12}^*)}{\sum Z^*},$$

$$S_{A'-10} = \frac{40e^{j0.3}(33.6e^{-j1.05} + 11.9e^{-j1.2} + 16.7e^{-j1.3}) + 25.4e^{j0.3}(11.9e^{-j1.2} + 16.7e^{-j1.3}) + 33.8e^{j0.22} * 16.7e^{-j1.3}}{142e^{j1.13}} =$$

$$= 26.4e^{j0.27} = 25.48 + j7.07 \text{ МВА}$$

$$S_{10-14} = \frac{S_{14}(Z_{12-14}^* + Z_{A-12}^*) - S_{10}(Z_{A'-10}^*) + S_{12}(Z_{A-12}^*)}{\sum Z^*},$$

$$S_{10-14} = \frac{25.4e^{j0.3}(11.9e^{-j1.2} + 16.7e^{-j1.3}) - 40e^{j0.3} * 14.6e^{-j1.5} + 33.8e^{j0.22} * 16.7e^{-j1.3}}{142e^{j1.13}} =$$

$$= 5.2e^{j0.4} = 4.81 + j2.09 \text{ МВА},$$

$$S_{14-12} = S_{10-14} + S_{12} = 5.2e^{j0.4} + 33.8e^{j0.22} = 39e^{j0.33} = 36.87 + j12.7 \text{ МВА},$$

На втором этапе произвожу расчёт с учётом потерь мощности. Для этого разрезаю линию с двухсторонним питанием (рис. 7) в точке потокоузла 12, представив её как две независимых линии с односторонним питанием, напряжения на концах которых равны (рис. 14).

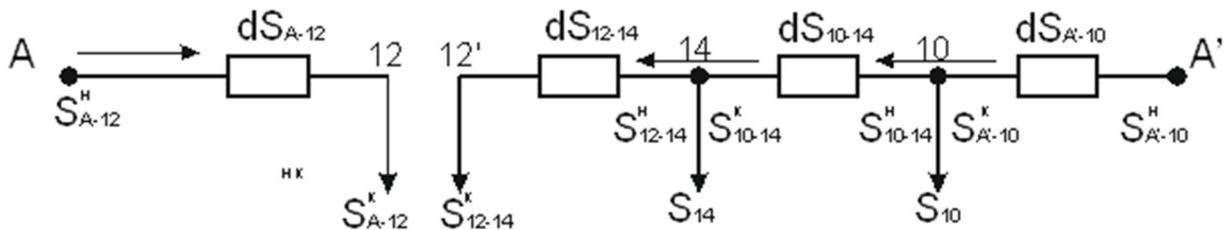


Рисунок 14. Схема замещения линии А,12,14,10,А в точке 12

Принимаю  $S_{A-12}^K = S_{A-12} = 25.7 + j5.64 \text{ МВА}$ .

Тогда потери мощности в линии А-3 составят:

$$\Delta S_{Z,A-12} = \frac{(P_{A-12}^K)^2 + (Q_{A-12}^K)^2}{U_{НОМ}^2} * Z_{A-12} =$$

$$= \frac{25.696^2 + 5.640^2}{110^2} * 16.7e^{j1.3} = 0.27 + j0.92 \text{ МВА}$$

Мощность в начале линии А-12:

$$\begin{aligned}
 S_{A-12}^H &= S_{A-12}^K + \Delta S_{Z,A-12} - j \frac{1}{2} Q_{A-12} = \\
 &= 25.7 + j5.64 + 0.27 + j0.92 - j \frac{1}{2} * 1.3 = 25.96 + j5.91 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

Для линии А-10 принимаю  $S_{A-10}^K = S_{A-10} = 25.48 + j7.07 \text{ МВА}$

$$\begin{aligned}
 \Delta S_{Z,A-10} &= \frac{(P_{A-10}^K)^2 + (Q_{A-10}^K)^2}{U_{НОМ}^2} * Z_{A-10} = \\
 &= \frac{25.48^2 + 7.07^2}{110^2} 14.6 e^{j1.5} = 0.04 + j0.84 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

Мощность в начале линии А-10:

$$\begin{aligned}
 S_{A-10}^H &= S_{A-10}^K + \Delta S_{Z,A-10} - j \frac{1}{2} Q_{A-10} = \\
 &= 25.48 + j7.07 + 0.04 + j0.84 - j \frac{1}{2} 1.18 = 25.52 + j7.32 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

Для линии А-10 принимаю  $S_{10-14}^K = S_{10-14} = 4.81 + j2.09 \text{ МВА}$

$$\begin{aligned}
 \Delta S_{Z,10-14} &= \frac{(P_{10-14}^K)^2 + (Q_{10-14}^K)^2}{U_{НОМ}^2} * Z_{10-14} = \\
 &= \frac{4.81^2 + 2.09^2}{110^2} * 33.6 e^{j1.05} = 25.52 + j7.32 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

Мощность в начале линии 10-14:

$$\begin{aligned}
 S_{10-14}^H &= S_{10-14}^K + \Delta S_{Z,10-14} - j \frac{1}{2} Q_{10-14} = \\
 &= 4.81 + j2.09 + 25.52 + j7.32 - j \frac{1}{2} 2.2 = 4.84 + j1.05 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

Для линии 14-12 принимаю  $S_{14-12}^K = S_{14-12} = 36.87 + j12.7 \text{ МВА}$ .

$$\begin{aligned}
 \Delta S_{Z,14-12} &= \frac{(P_{14-12}^K)^2 + (Q_{14-12}^K)^2}{U_{НОМ}^2} * Z_{14-12} = \\
 &= \frac{36.87^2 + 12.7^2}{110^2} * 11.9 e^{j1.2} = 0.54 + j1.4 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

Мощность в начале линии 14-12:

$$\begin{aligned}
 S_{14-12}^H &= S_{14-12}^K + \Delta S_{Z,14-12} - j \frac{1}{2} Q_{14-12} = \\
 &= 36.87 + j12.7 + 0.54 + j1.4 - j \frac{1}{2} 0.83 = 37.41 + j13.73 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

Аналогичным образом произвожу расчёт для двухцепной линии А-4.

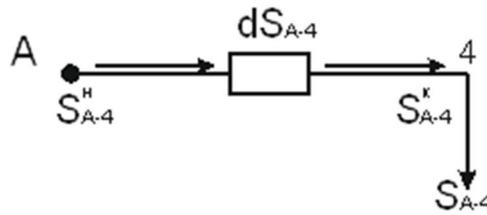


Рисунок 15. Схема замещения линии А-4

Принимаю  $S_{A-4}^K = S_{\text{расч},4} = 27.057 + j6.12$  МВА.

$$\begin{aligned} \Delta S_{Z,A-4} &= \frac{(P_{A-4}^K)^2 + (Q_{A-4}^K)^2}{U_{\text{НОМ}}^2} * Z_{A-4} / 2 = \\ &= \frac{27.057^2 + 6.12^2}{110^2} * 67.28e^{j1.05} / 2 = 1.061 + j1.86 \text{ МВА} \end{aligned}$$

Мощность в начале линии А-12:

$$\begin{aligned} S_{A-4}^H &= S_{A-4}^K + \Delta S_{Z,A-4} - j \frac{1}{2} Q_{A-4} = \\ &= 27.057 + j6.12 + 1.061 + j1.86 - \frac{j1}{2} 4.32 = 28.12 + j5.82 \text{ МВА} \end{aligned}$$

### 9.2.1. Определение значения напряжения в узловых точках в максимальном режиме на стороне ВН

Расчёт провожу от центра питания к потребителям по формуле:

$$U_i = U_{\text{Аmax}} - \frac{P_i^K R_i + Q_i^K X_i}{U_{\text{Аmax}}} \quad (13)$$

Подстанция №4

$$\begin{aligned} U_4 &= U_{\text{Аmax}} - \frac{P_{A-4}^K R_{A-4} + Q_{A-4}^K X_{A-4}}{U_{\text{Аmax}}} = \\ &= 119 - \frac{27,057 * 33.78 + 6,12 * 58.414}{119} = 108.4 \text{ КВ} \end{aligned}$$

Подстанция №10

$$\begin{aligned} U_{10} &= U_{\text{Аmax}} - \frac{P_{A-10}^K R_{A-10} + Q_{A-10}^K X_{A-10}}{U_{\text{Аmax}}} = \\ &= 119 - \frac{4.81 * 0.648 + 2.09 * 14.580}{119} = 117,995 \text{ КВ} \end{aligned}$$

Подстанция №12

$$U_{12} = U_{Amax} - \frac{P_{A-12}^K R_{A-12} + Q_{A-12}^K X_{A-12}}{U_{Amax}} =$$
$$= 119 - \frac{25.7 * 4.673 + 5.64 * 16.038}{119} = 117,23 \text{ КВ}$$

Подстанция №14

$$U_{14} = U_{Amax} - \frac{P_{10-14}^K R_{10-14} + Q_{10-14}^K X_{10-14}}{U_{Amax}} =$$
$$= 119 - \frac{4.81 * 16.69 + 2.09 * 29,2}{119} = 117,82 \text{ КВ}$$

### 9.2.2. Регулирование напряжения в электрической сети в максимальном режиме

Согласно [3 п.1.2.23] устройства регулирования напряжения должны обеспечивать необходимый уровень напряжения на шинах напряжением 3–20 кВ электростанций и подстанций, в пределах не ниже 105 % номинального в период наибольших нагрузок и не выше 100 % номинального в период наименьших нагрузок этих сетей. Отклонения от указанных уровней напряжения должны быть обоснованы. Поддержание указанных напряжений необходимо, для того чтобы не превысить допустимые отклонения напряжения на выводах электроприемников. Отклонение напряжений приёмника не должно превышать  $\pm 5\%$  и  $\pm 10\%$  от номинальных напряжений сети.

Согласно [3] на шинах 10 кВ подстанций должен осуществляться **закон встречного регулирования** напряжения в пределах отклонения напряжения от  $+ 5-6 \%$ . Для этого должны быть выбраны рабочие ответвления РПН понижающих трансформаторов.

Для этого необходимо найти отклонения на стороне высокого напряжения. Проще всего это сделать, приведя низшее напряжение к высокому.

Напряжение на шинах низшего напряжения, приведенное к стороне высшего напряжения для каждого из трансформаторов типа ТРДН для подстанций определяется как:  $U'_H = U_B - \Delta U_T$ , (14)

где  $\Delta U$  – падение напряжения на трансформаторе, которое можно выразить через формулу:

$$\Delta U_T = \frac{P'_H R_T + Q'_H X_T}{U'_H} \quad (15)$$

где  $P'_H, Q'_H$  – мощности, поступающие в обмотки ВН трансформатора с учётом потерь холостого хода:

$$P'_H = \frac{P_H}{2} + \Delta P_T - \Delta P_{XX}, \quad (16)$$

$$Q'_H = \frac{Q_H}{2} + \Delta Q_T - \Delta Q_{XX}, \quad (17)$$

Подставив уравнение (15) в (14) Получим:

$$U'_H = U_B - \frac{P'_H R_T + Q'_H X_T}{U'_H} \quad (16)$$

Умножив уравнение (16) на  $U'_H$  получаю уравнение типа ( $ax^2 + bx + c = 0$ ):

$$(U'_H)^2 = U_B U'_H + (P'_H R_T + Q'_H X_T) = 0 \quad (17)$$

После решения уравнения получаю:

$$U'_H = \frac{U_B}{2} + \sqrt{\frac{U_B^2}{4} - \frac{P'_H}{2} R_T + \frac{Q'_H}{2} X_T} \quad (18)$$

Активные и реактивные сопротивления трансформаторов находятся по формуле:

$$R_{ТВ} = \frac{\Delta P_{K,ВН-НН} U_{НОМ}^2}{2S_{НОМ}^2}; \quad (19)$$

$$R_{ТН1} = R_{ТН2} = 2R_{ТВ} \quad (20)$$

$$X_{ТВ} = \frac{u_{K,ВН-НН} U_{НОМ}^2}{100S_{НОМ}} \left(1 - \frac{K_P}{4}\right), \quad (21)$$

$$X_{ТН} = \frac{u_{K,ВН-НН} U_{НОМ}^2}{100S_{НОМ}} \left(\frac{K_P}{2}\right), \quad (22)$$

$$K_P = 4 \left( \frac{u_{K,ВН-НН1}}{u_{K,ВН-НН}} - 1 \right) \quad (23)$$

Подставив сопротивления в формулу (18) получаю:

$$U'_H = \frac{U_B}{2} + \sqrt{\frac{U_B^2}{4} - \left[ \left( P'_H R_{ТВ} + \frac{P'_H}{2} R_{ТН} \right) + \left( Q'_H X_{ТВ} + \frac{Q'_H}{2} X_{ТН} \right) \right]} \quad (24)$$

Далее расчётное ответвление регулируемой части ВН определяется по формуле:

$$n_{ОТВ}^{ЖЕЛ} = \left( \frac{U'_H U_{НН}}{U_{Жел} U_{ВН}} - 1 \right) \frac{100}{\Delta U_{ОТВ}} \quad (25)$$

Округлив до ближайшего целого числа, полученное значение находится действительное значение на шинах низшего напряжения подстанции:

$$U_H = \frac{U'_H U_{HH}}{U_{BH} \left(1 + n_{\text{отв}} \frac{\Delta U_{\text{отв}}}{100}\right)} \quad (26)$$

Отклонение напряжения на шинах питания сети от номинального ( $U_{НОМ} = 110\text{кВ}$ ), рассчитывается по формуле:

$$\delta U_H = \frac{U_H - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} * 100 \quad (27)$$

Произвожу расчёт для подстанции 4:

Используя формулы (19-23) нахожу активные и реактивные сопротивления трансформатора.

$$R_{ТВ,4} = \frac{\Delta P_{К,ВН-НН,4} U_{НОМ,4}^2}{2S_{НОМ,4}^2} = \frac{172 * 10^3 * (115 * 10^3)^2}{2 * (40 * 10^6)^2} = 0.711 \text{ Ом}$$

$$K_{P4} = 4 \left( \frac{u_{К,ВН-НН1,4}}{u_{К,ВН-НН,4}} - 1 \right) = 4 * \left( \frac{20}{10,5} - 1 \right) = 3.62$$

$$X_{ТВ4} = \frac{u_{К,ВН-НН4} U_{НОМ4}^2}{100S_{НОМ4}} \left(1 - \frac{K_{P4}}{4}\right) = \frac{10.5 * (115 * 10^3)^2}{100 * (40 * 10^6)^2} \left(1 - \frac{3.62}{4}\right) = 3.3 \text{ Ом}$$

$$X_{ТН4} = \frac{u_{К,ВН-НН4} U_{НОМ4}^2}{100S_{НОМ4}} \left(\frac{K_{P4}}{2}\right) = \frac{10.5 * (115 * 10^3)^2}{100 * (40 * 10^6)^2} \left(\frac{3.62}{2}\right) = 62.84 \text{ Ом}$$

По формулам (16,17) нахожу активные и реактивные мощности, поступающие в обмотку ВН:

$$P'_{H4} = \frac{P_{H4}}{2} + \Delta P_{T4} - \Delta P_{ХХ4} = \frac{27}{2} + 0.057 - 36 * 10^{-3} = 13.52 \text{ МВт}$$

$$Q'_{H4} = \frac{Q_{H4}}{2} + \Delta Q_{T4} - \Delta Q_{ХХ4} = \frac{8.1}{2} + 2.34 - 260 * 10^3 = 6.13 \text{ МВАр}$$

Используя формулу (24) нахожу напряжение низкой обмотки, приведённое к напряжению высокой обмотки:

$$\begin{aligned} U'_{H4} &= \frac{U_{B4}}{2} + \sqrt{\frac{U_{B4}^2}{4} - \left[ \left( P'_{H4} R_{ТВ4} + \frac{P'_{H4}}{2} R_{ТН4} \right) + \left( Q'_{H4} X_{ТВ4} + \frac{Q'_{H4}}{2} X_{ТН4} \right) \right]} = \\ &= \frac{108,4}{2} + \sqrt{\frac{108,4^2}{4} - \left[ \left( 13,5 * 0,7 + \frac{13,5}{2} * 0,7 \right) + \left( 6,1 * 3,3 + \frac{6,1}{2} * 62,8 \right) \right]} = \\ &= 106.27 \text{ кВ} \end{aligned}$$

Аналогичным образом произвожу расчёт для 10-й подстанции:

$$R_{ТВ,10} = 0.711 \text{ Ом}$$

$$X_{ТВ10} = 3.3 \text{ Ом}$$

$$X_{ТН10} = 62.84 \text{ Ом}$$

$$P'_{H10} = \frac{P_{H10}}{2} + \Delta P_{T10} - \Delta P_{XX10} = \frac{38}{2} + 0.078 - 36 * 10^{-3} = 19,04 \text{ МВт}$$

$$Q'_{H10} = \frac{Q_{H10}}{2} + \Delta Q_{T10} - \Delta Q_{XX10} = \frac{11,4}{2} + 4,34 - 260 * 10^3 = 9,78 \text{ МВАр}$$

$$\begin{aligned} U'_{H10} &= \frac{U_{B10}}{2} + \sqrt{\frac{U_{B10}^2}{4} - \left[ \left( P'_{H10} R_{ТВ10} + \frac{P'_{H10}}{2} R_{ТН10} \right) + \left( Q'_{H10} X_{ТВ10} + \frac{Q'_{H10}}{2} X_{ТН10} \right) \right]} = \\ &= \frac{117,995}{2} + \sqrt{\frac{117,995^2}{4} - \left[ \left( 19 * 0,7 + \frac{19}{2} 0,7 \right) + \left( 9,8 * 3,3 + \frac{9,8}{2} 62,8 \right) \right]} = \\ &= 114.86 \text{ кВ} \end{aligned}$$

Для подстанции №12:

$$R_{ТВ,12} = 0.711 \text{ Ом}$$

$$X_{ТВ12} = 3.3 \text{ Ом}$$

$$X_{ТН12} = 62.84 \text{ Ом}$$

$$P'_{H12} = \frac{P_{H12}}{2} + \Delta P_{T12} - \Delta P_{XX12} = \frac{32}{2} + 0.066 - 36 * 10^{-3} = 16,03 \text{ МВт}$$

$$Q'_{H12} = \frac{Q_{H12}}{2} + \Delta Q_{T12} - \Delta Q_{XX12} = \frac{9,6}{2} + 3,19 - 260 * 10^3 = 7,73 \text{ МВАр}$$

$$\begin{aligned} U'_{H12} &= \frac{U_{B12}}{2} + \sqrt{\frac{U_{B12}^2}{4} - \left[ \left( P'_{H12} R_{ТВ12} + \frac{P'_{H12}}{2} R_{ТН12} \right) + \left( Q'_{H12} X_{ТВ12} + \frac{Q'_{H12}}{2} X_{ТН12} \right) \right]} = \\ &= \frac{117,23}{2} + \sqrt{\frac{117,23^2}{4} - \left[ \left( 16 * 0,7 + \frac{16}{2} 0,7 \right) + \left( 7,73 * 3,3 + \frac{7,73}{2} 62,8 \right) \right]} = \\ &= 114.74 \text{ кВ} \end{aligned}$$

Для подстанции №14:

$$R_{ТВ,14} = \frac{\Delta P_{К,ВН-НН,14} U_{НОМ,14}^2}{2 S_{НОМ,14}^2} = \frac{120 * 10^3 * (115 * 10^3)^2}{2 * (25 * 10^6)^2} = 1,27 \text{ Ом}$$

$$K_{P14} = 4 \left( \frac{u_{К,ВН-НН,14}}{u_{К,ВН-НН,14}} - 1 \right) = 4 * \left( \frac{20}{10,5} - 1 \right) = 3.62$$

$$\begin{aligned} X_{ТВ14} &= \frac{u_{К,ВН-НН,14} U_{НОМ,14}^2}{100 S_{НОМ,14}} \left( 1 - \frac{K_{P14}}{4} \right) = \frac{10.5 * (115 * 10^3)^2}{100 * (25 * 10^6)^2} \left( 1 - \frac{3.62}{4} \right) = \\ &= 5,28 \text{ Ом} \end{aligned}$$

$$X_{ТН14} = \frac{u_{К,ВН-НН,14} U_{НОМ,14}^2}{100 S_{НОМ,14}} \left( \frac{K_{P14}}{2} \right) = \frac{10.5 * (115 * 10^3)^2}{100 * (25 * 10^6)^2} \left( \frac{3.62}{2} \right) = 100,54 \text{ Ом}$$

$$P'_{H14} = \frac{P_{H14}}{2} + \Delta P_{T14} - \Delta P_{XX14} = \frac{24}{2} + 0,058 - 27 * 10^{-3} = 12,03 \text{ МВт}$$

$$Q'_{H14} = \frac{Q_{H14}}{2} + \Delta Q_{T14} - \Delta Q_{XX14} = \frac{8,4}{2} + 2,9 - 175 * 10^3 = 6,92 \text{ МВАр}$$

$$U'_{H14} = \frac{U_{B14}}{2} + \sqrt{\frac{U_{B14}^2}{4} - \left[ \left( P'_{H14} R_{TB14} + \frac{P'_{H14}}{2} R_{TH14} \right) + \left( Q'_{H14} X_{TB14} + \frac{Q'_{H14}}{2} X_{TH14} \right) \right]} =$$

$$= \frac{117,82}{2} + \sqrt{\frac{117,82^2}{4} - \left[ \left( 12 * 1,27 + \frac{12}{2} * 1,27 \right) + \left( 6,9 * 5,3 + \frac{6,9}{2} * 100,54 \right) \right]} =$$

$$= 114,24 \text{ кВ}$$

Используя формулы (25, 26, 27), определяю расчётное ответвление и действующее значение низшего напряжения, приняв  $U_{H\text{жел}} = 10,5 \text{ кВ}$ :

$$n_{\text{отв}}^{\text{жел}} = \left( \frac{U'_H U_{HH}}{U_{H\text{жел}} U_{BH}} - 1 \right) \frac{100}{\Delta U_{\text{отв}}}$$

$$U_H = \frac{U'_H U_{HH}}{U_{BH} \left( 1 + n_{\text{отв}} \frac{\Delta U_{\text{отв}}}{100} \right)}$$

Подстанция 4.

$$n_{\text{отв}4}^{\text{жел}} = \left( \frac{106,3 * 10,5}{10,5 * 115} - 1 \right) * \frac{100}{1,78} = -4,27$$

Принимаю  $n_{\text{отв}4}^{\text{жел}} = -4$ .

$$U_{H4} = \frac{106,3 * 10,5}{115 * \left( 1 - 4 * \frac{1,78}{100} \right)} = 10,45 \text{ кВ}$$

$$\delta U_{H4} = \frac{10,45 - 10}{10} * 100 = 0,45\%$$

Подстанция 10.

$$n_{\text{отв}10}^{\text{жел}} = \left( \frac{114,86 * 10,5}{10,5 * 115} - 1 \right) * \frac{100}{1,78} = 2,48$$

Принимаю  $n_{\text{отв}10}^{\text{жел}} = 2$ .

$$U_{H10} = \frac{114,86 * 10,5}{115 * \left( 1 + 2 * \frac{1,78}{100} \right)} = 10,127 \text{ кВ}$$

$$\delta U_{H10} = \frac{10,127 - 10}{10} * 100 = 0,013\%$$

Подстанция 12.

$$n_{\text{ОТВ}12}^{\text{ЖЕЛ}} = \left( \frac{114.74 * 10.5}{10.5 * 115} - 1 \right) * \frac{100}{1.78} = 2.42$$

Принимаю  $n_{\text{ОТВ}12}^{\text{ЖЕЛ}} = 2$ .

$$U_{H12} = \frac{114.74 * 10.5}{115 * \left( 1 + 2 * \frac{1.78}{100} \right)} = 10.116 \text{ кВ}$$

$$\delta U_{H12} = \frac{10.116 - 10}{10} * 100 = 0.012\%$$

Подстанция 14.

$$n_{\text{ОТВ}14}^{\text{ЖЕЛ}} = \left( \frac{114.24 * 10.5}{10.5 * 115} - 1 \right) * \frac{100}{1.78} = 2.17$$

Принимаю  $n_{\text{ОТВ}14}^{\text{ЖЕЛ}} = 2$ .

$$U_{H14} = \frac{114.24 * 10.5}{115 * \left( 1 + 2 * \frac{1.78}{100} \right)} = 10.087 \text{ кВ}$$

$$\delta U_{H14} = \frac{10.087 - 10}{10} * 100 = 0.009\%$$

Таблица 17.

Результаты расчёта максимального режима				
№ п/с	$U'_H$ , кВ	$n_{\text{ОТВ}}$	$U_H$ , кВ	$\delta U_H$ , %
4	106,27	-4	10.45	0.045
10	114,86	2	10.13	0.013
12	114,74	2	10.12	0.012
14	114,25	2	10.09	0.009

### 9.3. Послеаварийный режим

В качестве послеаварийного режима рассмотрим обрыв линии А-12, так как такой режим является аварийным.

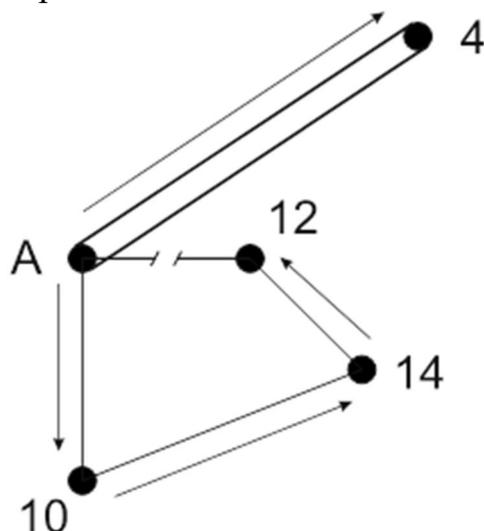


Рисунок 16. Обрыв линии А-12.

Начинаю расчёт с линии А-4, так как авария на неё напрямую не оказывает существенного влияния.

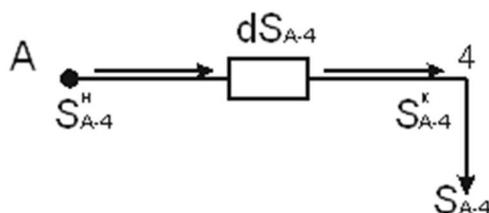


Рисунок 17. Схема замещения линии А-4

$$S_{\text{расч},4} = 27.057 + j6.12 \text{ МВА}$$

$$S_{A-4}^K = S_{\text{расч},4} = 27.057 + j6.12 \text{ МВА.}$$

$$\Delta S_{Z,A-4} = \frac{(P_{A-4}^K)^2 + (Q_{A-4}^K)^2}{U_{\text{НОМ}}^2} * Z_{A-4}/2 =$$

$$= \frac{27.057^2 + 6.12^2}{110^2} * 67.28e^{j1.05}/2 = 1.061 + j1.86 \text{ МВА}$$

$$S_{A-4}^H = S_{A-4}^K + \Delta S_{Z,A-4} - j\frac{1}{2}Q_{A-4} =$$

$$= 27.057 + j6.12 + 1.061 + j1.86 - \frac{j1}{2}4.32 = 28.12 + j5.82 \text{ МВА}$$

Расчитываю линию А-10-14-12.

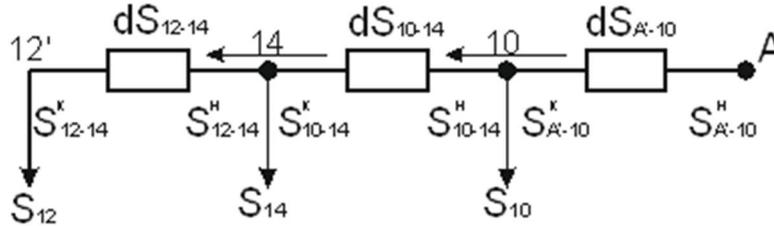


Рисунок 18. Схема замещения линии А-10-14-12.

Расчёт начинаю с конца.

$$S_{\text{расч},12} = S_{H,12} + \Delta S_{12} - jQ_{C,12-14}^H = (32 + j9.6) + (0.066 + j3.19) - j0.83 = 32.066 + j11.96 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{расч},14} = S_{H,14} + \Delta S_{14} - j(Q_{C,10-14}^K + Q_{C,12-14}^K) = (24 + j8.4) + (0.058 + j2.9) - j(2.2 + 0.83) = 24.058 + j8.27 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{расч},10} = S_{H,10} + \Delta S_{10} - j(Q_{C,A-10}^K + Q_{C,14-10}^H) = (38 + j11.4) + (0.078 + j4.34) - j(1.18 + 2.2) = 38.078 + j12.36 \text{ МВА}$$

$$S_{14-12}^K = S_{\text{расч},12} = 32.066 + j11.96 \text{ МВА}$$

$$\Delta S_{Z,14-12} = \frac{(P_{14-12}^K)^2 + (Q_{14-12}^K)^2}{U_{\text{НОМ}}^2} * Z_{12-14} = \frac{32,066^2 + 11.96^2}{110^2} * 11.95e^{j1.2} = 0.42 + j1.079 \text{ МВА}$$

$$S_{14-12}^H = S_{14-12}^K + \Delta S_{Z,14-12} = 32.066 + j11.96 + 0.42 + j1.079 = 26.11 + j6.72 \text{ МВА}$$

$$S_{10-14}^K = S_{\text{расч},14} + S_{14-12}^H = 24.058 + j8.27 + 26.11 + j6.72 = 50.17 + j14.99 \text{ МВА}$$

$$\Delta S_{Z,10-14} = \frac{(P_{10-14}^K)^2 + (Q_{10-14}^K)^2}{U_{\text{НОМ}}^2} * Z_{10-14} = \frac{50.17^2 + 14.99^2}{110^2} * 33.64e^{j1.05} = 3.78 + j6.62 \text{ МВА}$$

$$S_{10-14}^H = S_{10-14}^K + \Delta S_{Z,10-14} = 50.17 + j14.99 + 3.78 + j6.62 = 53.95 + j21.61 \text{ МВА}$$

$$S_{A-10}^K = S_{\text{расч},10} + S_{10-14}^H = 38.078 + j12.36 + 53.95 + j21.61 = 78.01 + j29.88 \text{ МВА}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{Z,A-10} &= \frac{(P_{A-10}^K)^2 + (Q_{A-10}^K)^2}{U_{\text{НОМ}}^2} * Z_{A-10} = \\ &= \frac{78.01^2 + 29.88^2}{110^2} * 14.59e^{j1.53} = 0.37 + j8.4 \text{ МВА} \\ S_{A-10}^H &= S_{A-10}^K + \Delta S_{Z,A-10} = \\ &= 78.01 + 29.88 + 0.37 + j8.4 = 78.38 + j38.29 \text{ МВА} \end{aligned}$$

### 9.3.1. Определение значения напряжения в узловых точках в послеаварийном режиме

Подстанция №4

$$\begin{aligned} U_4 &= U_{\text{Авар}} - \frac{P_{A-4}^K R_{A-4} + Q_{A-4}^K X_{A-4}}{U_{\text{Авар}}} = \\ &= 110 - \frac{27,057 * 33.78 + 6,12 * 58.414}{110} = 98,5 \text{ КВ} \end{aligned}$$

Подстанция №10

$$\begin{aligned} U_{10} &= U_{\text{Авар}} - \frac{P_{A-10}^K R_{A-10} + Q_{A-10}^K X_{A-10}}{U_{\text{Авар}}} = \\ &= 110 - \frac{78,01 * 0.648 + 29,88 * 14.580}{110} = 105,58 \text{ КВ} \end{aligned}$$

Подстанция №12

$$\begin{aligned} U_{12} &= U_{\text{Авар}} - \frac{P_{14-12}^K R_{14-12} + Q_{14-12}^K X_{14-12}}{U_{\text{Авар}}} = \\ &= 110 - \frac{32,066 * 4,29 + 11,96 * 11,15}{110} = 107,536 \text{ КВ} \end{aligned}$$

Подстанция №14

$$\begin{aligned} U_{14} &= U_{\text{Авар}} - \frac{P_{10-14}^K R_{10-14} + Q_{10-14}^K X_{10-14}}{U_{\text{Авар}}} = \\ &= 110 - \frac{50,17 * 16.69 + 14,99 * 29,2}{110} = 98,408 \text{ КВ} \end{aligned}$$

### 9.3.2. Регулирование напряжения в электрической сети в послеаварийном режиме

$$\begin{aligned}
 U'_{H4} &= \frac{U_{B4}}{2} + \sqrt{\frac{U_{B4}^2}{4} - \left[ \left( P'_{H4} R_{TB4} + \frac{P'_{H4}}{2} R_{TH4} \right) + \left( Q'_{H4} X_{TB4} + \frac{Q'_{H4}}{2} X_{TH4} \right) \right]} = \\
 &= \frac{98,54}{2} + \sqrt{\frac{98,54^2}{4} - \left[ \left( 13,5 * 0,7 + \frac{13,5}{2} 0,7 \right) + \left( 6,1 * 3,3 + \frac{6,1}{2} 62,8 \right) \right]} = \\
 &= 96,177 \text{ кВ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U'_{H10} &= \frac{U_{B10}}{2} + \sqrt{\frac{U_{B10}^2}{4} - \left[ \left( P'_{H10} R_{TB10} + \frac{P'_{H10}}{2} R_{TH10} \right) + \left( Q'_{H10} X_{TB10} + \frac{Q'_{H10}}{2} X_{TH10} \right) \right]} = \\
 &= \frac{105,58}{2} + \sqrt{\frac{105,58^2}{4} - \left[ \left( 19 * 0,7 + \frac{19}{2} 0,7 \right) + \left( 9,8 * 3,3 + \frac{9,8}{2} 62,8 \right) \right]} = \\
 &= 102,05 \text{ кВ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U'_{H12} &= \frac{U_{B12}}{2} + \sqrt{\frac{U_{B12}^2}{4} - \left[ \left( P'_{H12} R_{TB12} + \frac{P'_{H12}}{2} R_{TH12} \right) + \left( Q'_{H12} X_{TB12} + \frac{Q'_{H12}}{2} X_{TH12} \right) \right]} = \\
 &= \frac{107,54}{2} + \sqrt{\frac{107,54^2}{4} - \left[ \left( 16 * 0,7 + \frac{16}{2} 0,7 \right) + \left( 7,73 * 3,3 + \frac{7,73}{2} 62,8 \right) \right]} = \\
 &= 104,81 \text{ кВ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U'_{H14} &= \frac{U_{B14}}{2} + \sqrt{\frac{U_{B14}^2}{4} - \left[ \left( P'_{H14} R_{TB14} + \frac{P'_{H14}}{2} R_{TH14} \right) + \left( Q'_{H14} X_{TB14} + \frac{Q'_{H14}}{2} X_{TH14} \right) \right]} = \\
 &= \frac{96,18}{2} + \sqrt{\frac{96,18^2}{4} - \left[ \left( 12 * 1,27 + \frac{12}{2} 1,27 \right) + \left( 6,9 * 5,3 + \frac{6,9}{2} 100,54 \right) \right]} = \\
 &= 94,076 \text{ кВ}
 \end{aligned}$$

$$n_{\text{ОТВ}}^{\text{ЖЕЛ}} = \left( \frac{U'_H U_{HH}}{U_{H\text{жел}} U_{BH}} - 1 \right) \frac{100}{\Delta U_{\text{ОТВ}}}$$

$$U_H = \frac{U'_H U_{HH}}{U_{BH} \left( 1 + n_{\text{ОТВ}} \frac{\Delta U_{\text{ОТВ}}}{100} \right)}$$

Подстанция 4.

$$n_{\text{ОТВ4}}^{\text{ЖЕЛ}} = \left( \frac{96.18 * 10.5}{10.5 * 115} - 1 \right) * \frac{100}{1.78} = -9.2$$

Принимаю  $n_{\text{ОТВ4}}^{\text{ЖЕЛ}} = -9$ .

$$U_{H4} = \frac{96.18 * 10.5}{115 * \left( 1 - 9 * \frac{1.78}{100} \right)} = 10.46 \text{ кВ}$$

$$\delta U_{H4} = \frac{10.46 - 10}{10} * 100 = 0.46\%$$

Подстанция 10.

$$n_{\text{ОТВ10}}^{\text{ЖЕЛ}} = \left( \frac{102.05 * 10.5}{10.5 * 115} - 1 \right) * \frac{100}{1.78} = -4.06$$

Принимаю  $n_{\text{ОТВ10}}^{\text{ЖЕЛ}} = -4$ .

$$U_{H10} = \frac{102.5 * 10.5}{115 * \left( 1 - 4 * \frac{1.78}{100} \right)} = 10.032 \text{ кВ}$$

$$\delta U_{H10} = \frac{10.032 - 10}{10} * 100 = 0.003\%$$

Подстанция 12.

$$n_{\text{ОТВ12}}^{\text{ЖЕЛ}} = \left( \frac{104.81 * 10.5}{10.5 * 115} - 1 \right) * \frac{100}{1.78} = -2.65$$

Принимаю  $n_{\text{ОТВ12}}^{\text{ЖЕЛ}} = -3$ .

$$U_{H12} = \frac{104.81 * 10.5}{115 * \left( 1 - 3 * \frac{1.78}{100} \right)} = 10.11 \text{ кВ}$$

$$\delta U_{H12} = \frac{10.11 - 10}{10} * 100 = 0.011\%$$

Подстанция 14.

$$n_{\text{ОТВ}14}^{\text{ЖЕЛ}} = \left( \frac{94.076 * 10.5}{10.5 * 115} - 1 \right) * \frac{100}{1.78} = -8.133$$

Принимаю  $n_{\text{ОТВ}12}^{\text{ЖЕЛ}} = -8$ .

$$U_{H12} = \frac{94.076 * 10.5}{115 * \left( 1 - 8 * \frac{1.78}{100} \right)} = 11.159 \text{ кВ}$$

$$\delta U_{H14} = \frac{11.159 - 10}{10} * 100 = 0.116\%$$

Таблица 17.

Результаты расчёта послеаварийного режима				
№ п/с	$U'_H$ , кВ	$n_{\text{ОТВ}}$	$U_H$ , кВ	$\delta U_H$ , %
4	96.18	-8	10.46	0.046
10	102.05	-4	10.03	0.003
12	104.81	-3	10.11	0.011
14	94.08	-8	10.16	0.116

## ЛИТЕРАТУРА

1. Основы проектирования систем электроснабжения. В.Д. Маньков, С-Петербург, 2010 г.
2. Электропитающие системы и электрические сети. В.Н. Костин, С-Петербург, 2007 г.
3. Правила устройства электроустановок (изд.7-е) – М.: Издательство НЦЭНАС, 2003 г..
4. Справочник по проектированию электрических сетей./Под ред. Д.Л. Файбисовича. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. – М.: ЭНАС, 2007.
5. Электротехнический справочник / Под ред. В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, В.А. Лабунцова и др. 7-е Изд. Том 3. Кн.1. – М.: Энергоатомиздат,1988.
6. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. СО 153-34.20.118-2003. Утверждены приказом Минэнерго России от 30.06.03 №281.
7. Нормы технологического проектирования. «Проектирование электроснабжения промышленных предприятий». НТП ЭПП-94.
8. ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91) «Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов». Введен в действие с 01.01.2002 г. Минск (взамен ГОСТ 14209-85)
9. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения. 278 тм-Т1 СТО 56947007-29.240.30.010-2008 (№ ФСК ЕЭС). ОАО Энергосетьпроект, Москва, 2007 г.
10. Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий. ВНИПИ Тяжпромэлектропроект 1993 г.
11. Приказ от 22 февраля 2007 г. №49 Министерства промышленности и энергетики РФ «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения) с приложением «Предельные значения коэффициента реактивной мощности». 25 стр
12. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ (НТП ПС). Стандарт организации. Приложение к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» от 13.04.2009 №136. Москва 2009 г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Институт электроэнергетики и электроники

(полное название института)

Электроэнергетические системы и сети

(полное название кафедры)

Отзыв руководителя на курсовой проект

Обучающегося (ейся) Губарева Никиты Александровича

(фамилия, имя, отчество)

Группа ЭС-1-17

На тему: Проектирование районной электрической сети

Показатели	Критерии оценивания	Рейтинговая оценка (от 0 до 100 баллов)
1. Самостоятельность выполнения работы	Работа написана самостоятельно	15
	Работа носит частично самостоятельный характер	
	Работа носит не самостоятельный характер	
1. Содержание работы	Полностью соответствует выбранной теме	10
	Частично соответствует выбранной теме	
	Не соответствует теме	
2. Элементы исследования	Определены цели и задачи исследования, сформулированы объект и предмет исследования, показана история и теория вопроса	10
	Определены цели и задачи исследования, не четко определены объект и предмет исследования, частично показана история и теория вопроса	
	Не определены цели и задачи исследования, не сформулированы объект и предмет исследования, не показана история и теория вопроса	
4. Цитирование и наличие ссылочного материала	Достаточно	10
5. Наличие собственных выводов, рекомендаций и предложений, собственной позиции и ее аргументации	Да	15
	Нет	

Оформление работы	Соответствует полностью требованиям	10
	Соответствует частично требованиям	
	Не соответствует требованиям	
7. Библиография по теме работы	Актуальна и составлена в соответствии с требованиями	15
	Актуальна и частично соответствует требованиям	
	Не соответствует требованиям	
<b>Итоговый балл</b>		<b>85</b>

Отмеченные достоинства \_\_\_\_\_

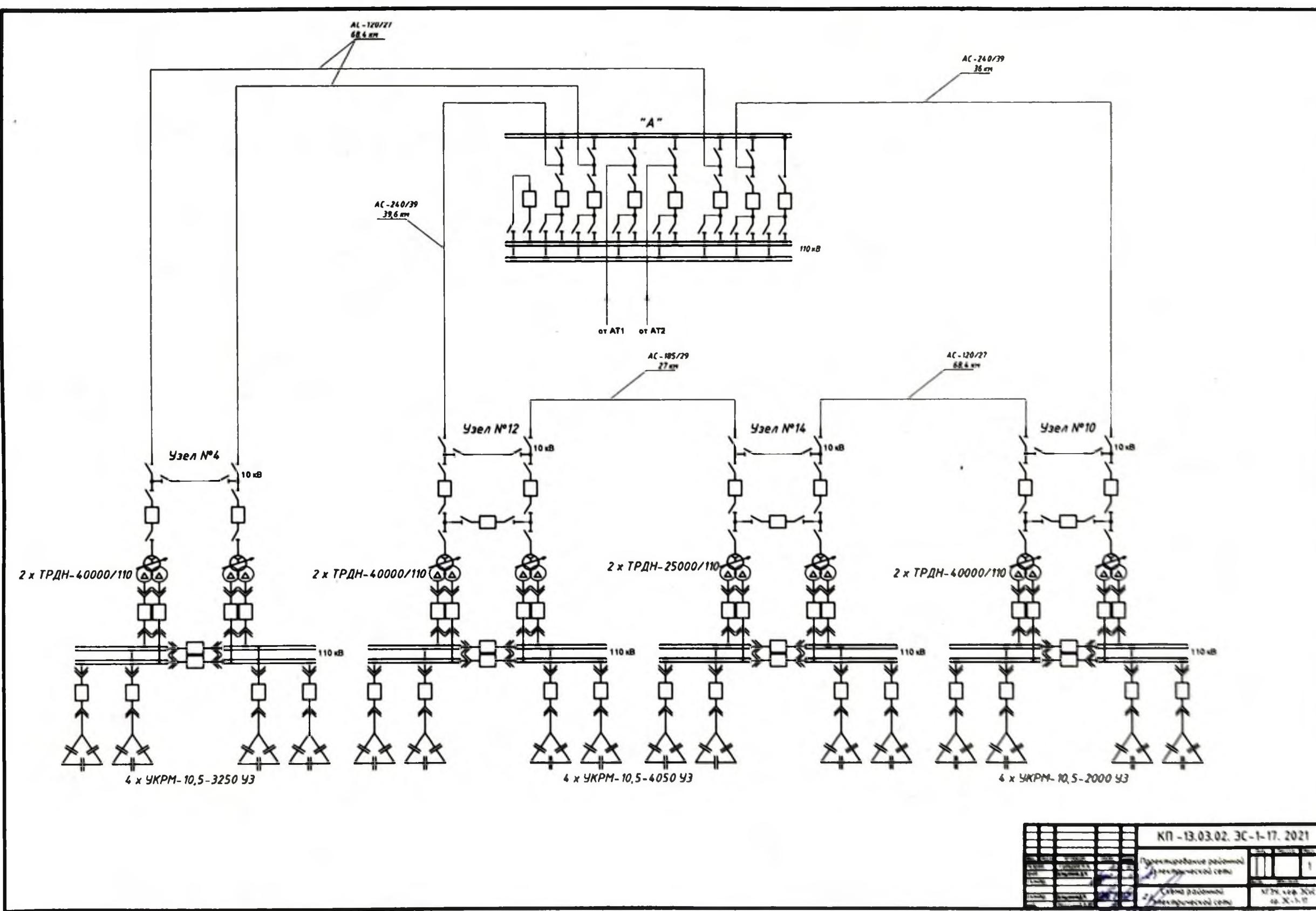
Отмеченные недостатки \_\_\_\_\_

Заключение \_\_\_\_\_

Руководитель \_\_\_\_\_ Валиуллина Дилля Мансуровна, доцент, к.т.н., доцент  
(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

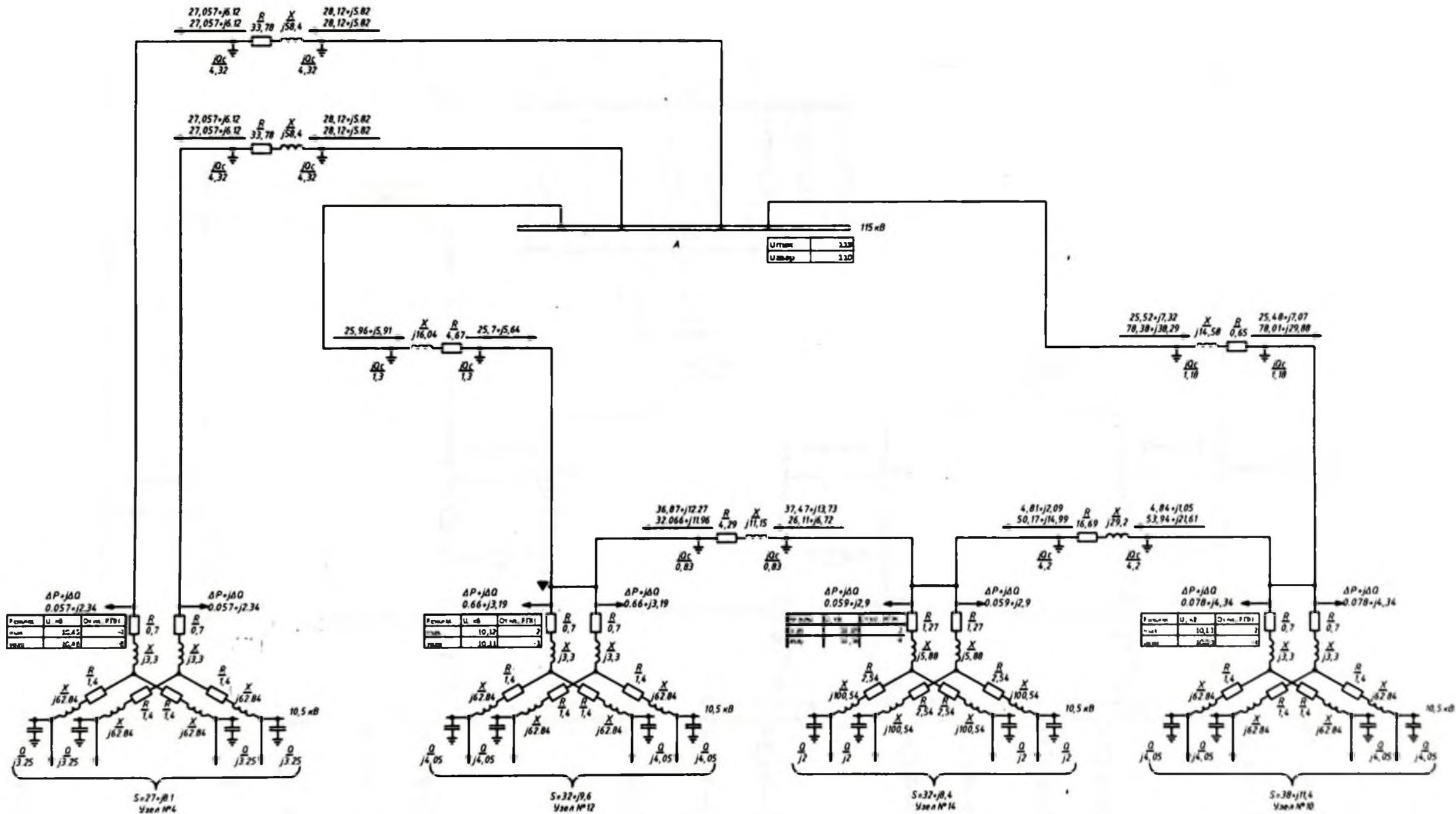
Дата: « 22 » 01 2021г.

Подпись \_\_\_\_\_ 



КП-13.03.02. ЗС-1-17. 2021	
Проектирование районной электрической сети	1
Схема районной электрической сети	13.03.02. ЗС-1-17. 2021

10/11



КП - 13.03.02. ЭС - 1-17. 2021	
Проектирование районной электрической сети	1
Схема занесения РЭС	1
ЛП 19, к.в. ЭС	10.11.17

157

## Справка о проверке на наличие заимствований

Имя файла: Губарев Н.А.\_ЭС-1-17.курсовик.docx

Автор: Губарев Н.А.

Заглавие: ЭС-1-17

Год публикации: 2021

Комментарий: Не указан

Подразделение: КГЭУ / ~

Коллекции: Интернет 2.0, Русскоязычная Википедия, Англоязычная Википедия, Коллекция Энциклопедий, Библиотека Либрусек, Университетская библиотека, Коллекция КФУ, ВКР Российского университета кооперации, Коллекция АПУ ФСИН, Коллекция ПГУТИ, Научная электронная библиотека "КиберЛенинка", ЦНМБ Сеченова, Авторефераты ВАК, Диссертации ВАК, Диссертации РГБ, Авторефераты РГБ, Готовые рефераты, ФИПС. Изобретения, ФИПС. Полезные модели, ФИПС. Промышленные образцы, Коллекция Руконт, Библиотека им. Ушинского, Готовые рефераты (часть 2), Открытые научные источники, eLIBRARY.RU, БиблиоРоссика, Правовые документы I, Правовые документы II, Правовые документы III, Собрание законодательства Российской Федерации



### 📄 Результат проверки

**Оценка оригинальности документа:** 69%

Оригинальные фрагменты: 69,05%

Сопорудительные заимствования: 30,95%

Цитирование: 0,00%



Работу проверил: Валиулина Д.М.

Дата: 16.01.2021

Подпись: