

Контрольная работа

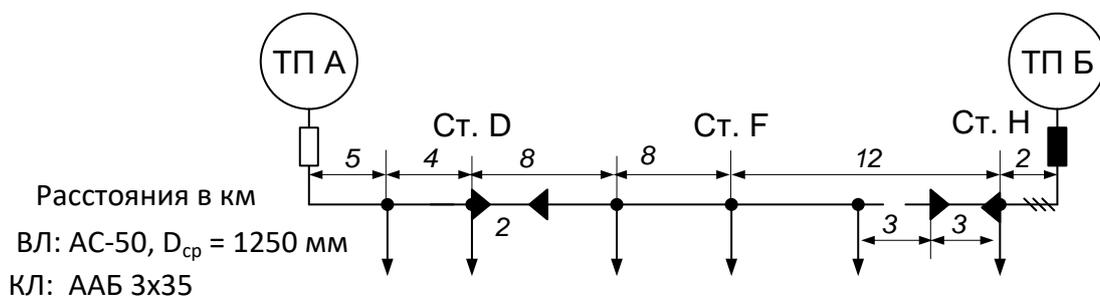
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И БЛОКИРОВКИ

Цель занятия:

– овладеть навыками электрического расчета высоковольтных воздушных и кабельных линий электропередачи переменного тока, питающих устройства сигнализации, централизации и блокировки железной дороги.

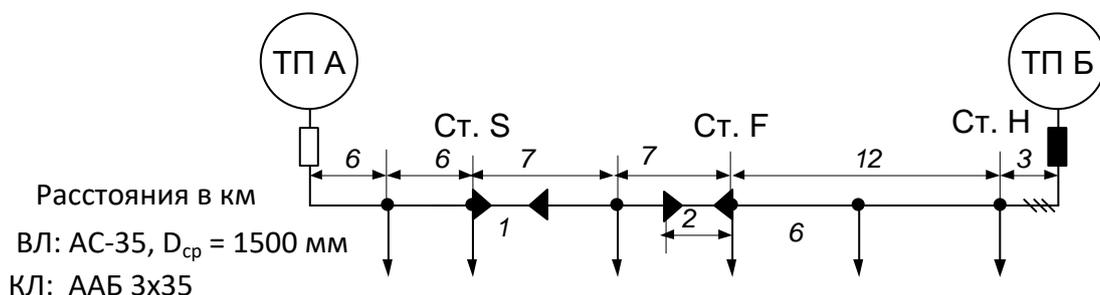
Исходные данные для выполнения контрольной работы приведены по каждому варианту задания в виде расчетной схема электрической сети и таблицы параметров нагрузок.

Вариант № 1 (U=10 кВ)



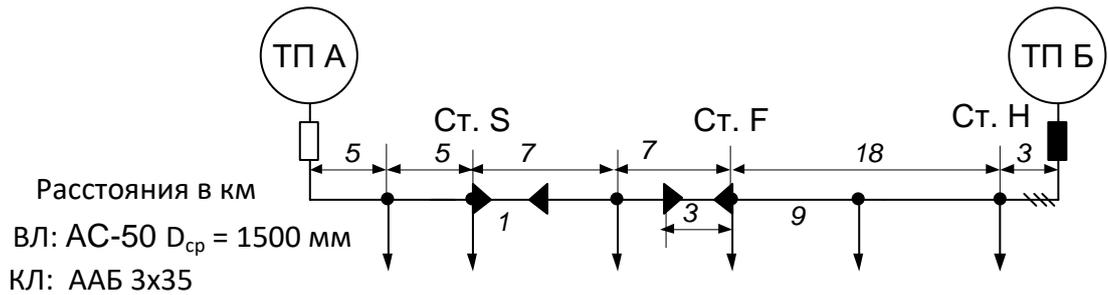
Активная мощность j-той нагрузки, p_j , кВт	-	26	17	45	-	19	15	35
Реактивная мощность j-той нагрузки, q_j , кВАр	-	17	14	39	-	14	12	30

Вариант № 2 (U=10 кВ)



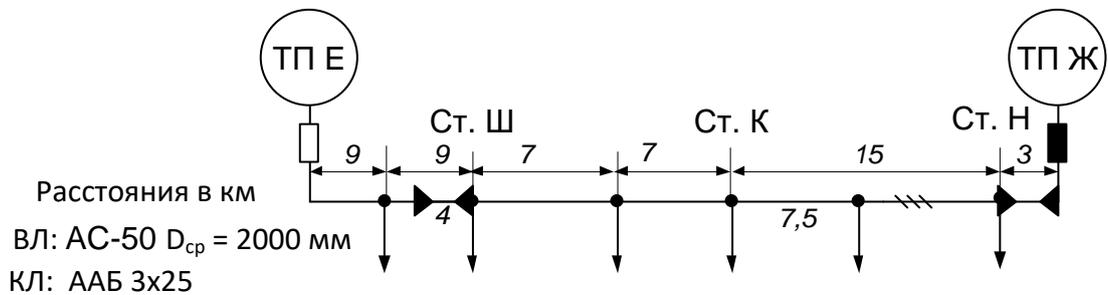
Активная мощность j-той нагрузки, p_j , кВт	-	18	45	12	-	25	14	20
Реактивная мощность j-той нагрузки, q_j , кВАр	-	14	39	10	-	22	11	18

Вариант № 3 (U=10 кВ)



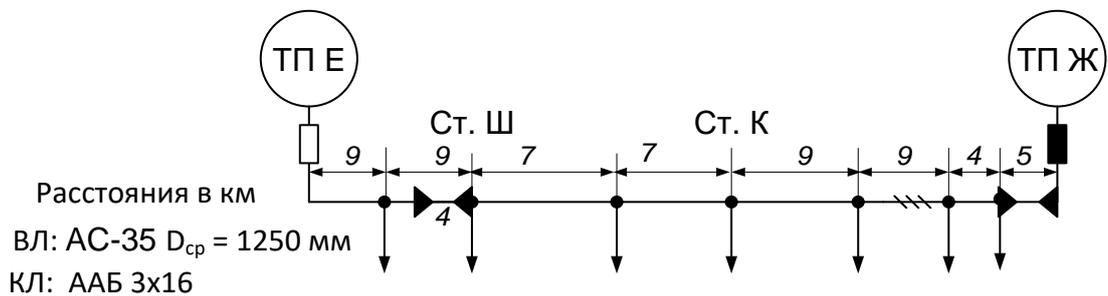
Активная мощность j-той нагрузки, p_j , кВт	-	28	55	18	-	56	24	60
Реактивная мощность j-той нагрузки, q_j , кВАр	-	20	49	17	-	50	20	50

Вариант № 4 (U=10 кВ)



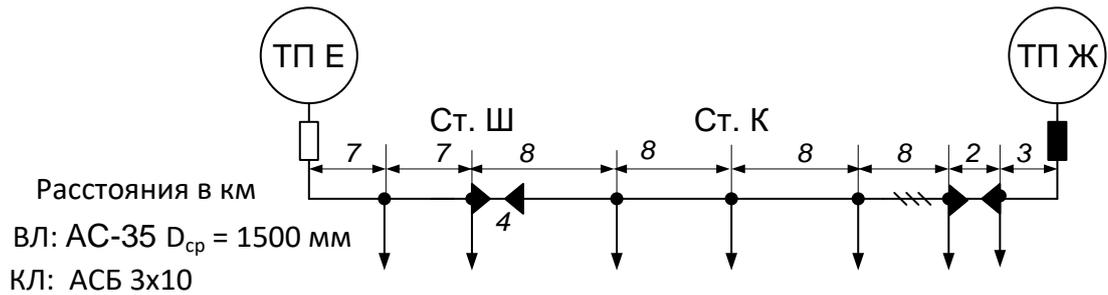
Активная мощность j-той нагрузки, p_j , кВт	-	28	55	18	-	56	24	60
Реактивная мощность j-той нагрузки, q_j , кВАр	-	20	49	17	-	50	20	50

Вариант № 5 (U=10 кВ)



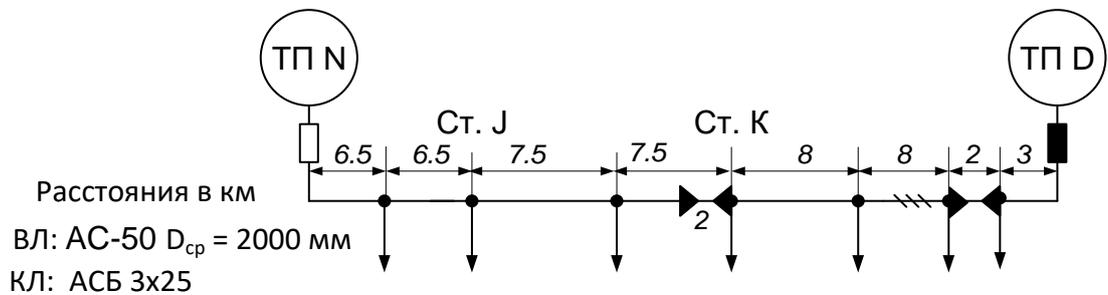
Активная мощность j-той нагрузки, p_j , кВт	-	28	55	28	-	62	25	15	70
Реактивная мощность j-той нагрузки, q_j , кВАр	-	20	49	22	-	54	19	12	60

Вариант № 6 (U=10 кВ)



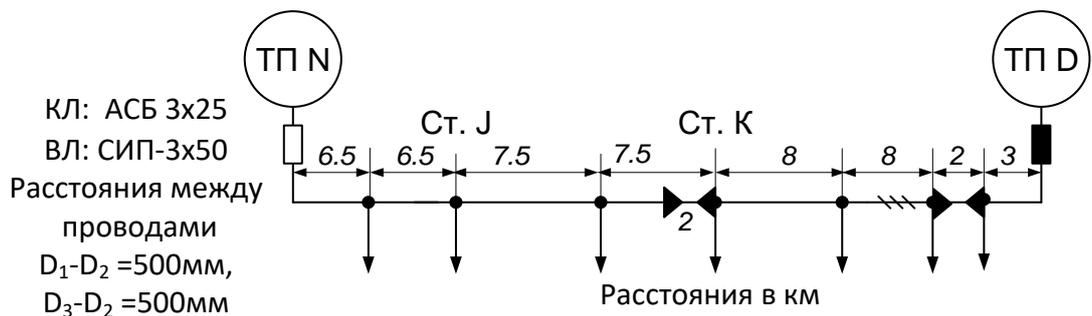
Активная мощность j-той нагрузки, p_j , кВт	-	30	45	26	-	50	30	15	60
Реактивная мощность j-той нагрузки, q_j , кВАр	-	22	41	20	-	46	24	12	40

Вариант № 7 (U=10 кВ)



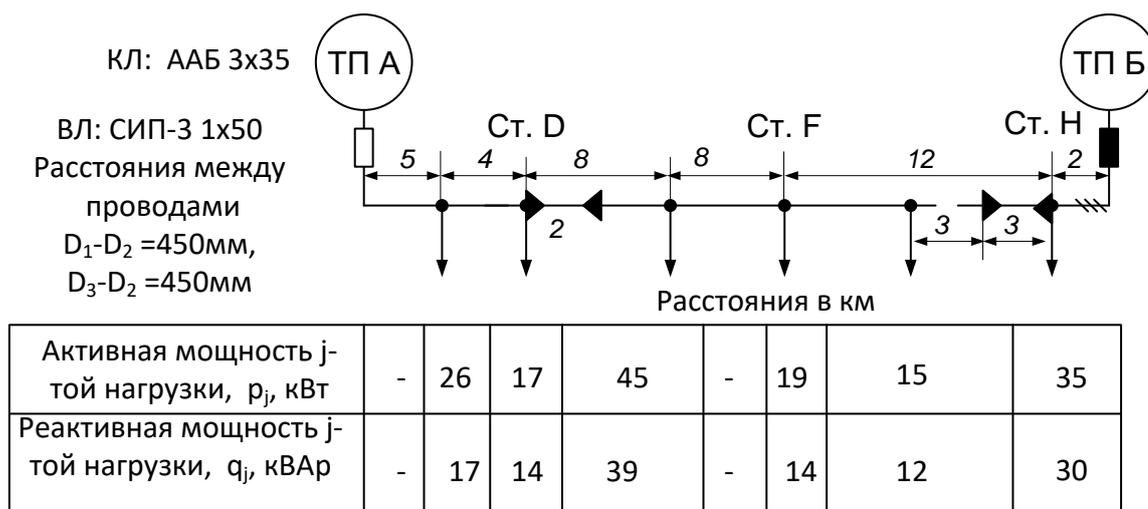
Активная мощность j-той нагрузки, p_j , кВт	-	35	72	25	-	70	32	35	80
Реактивная мощность j-той нагрузки, q_j , кВАр	-	30	60	20	-	62	25	25	69

Вариант № 8 (U=10 кВ)

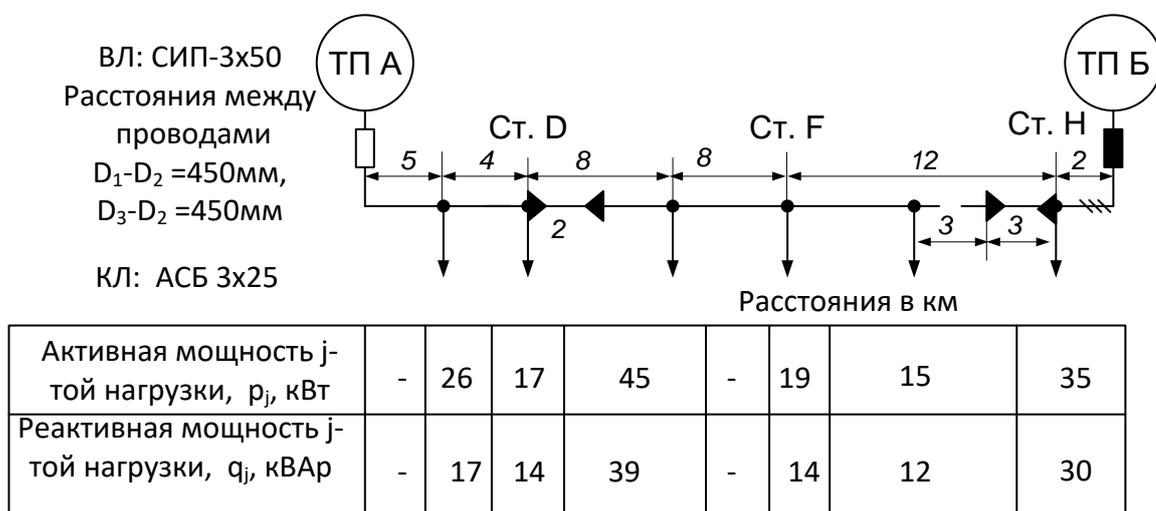


Активная мощность j-той нагрузки, p_j , кВт	-	35	72	25	-	70	32	35	80
Реактивная мощность j-той нагрузки, q_j , кВАр	-	30	60	20	-	62	25	25	69

Вариант № 9 (U=10 кВ)



Вариант № 10 (U=10 кВ)



Содержание задания. В рамках электрического расчета для двух вариантов питания высоковольтных линий сигнализации, централизации и блокировки (ВЛ СЦБ): а) от правой тяговой подстанции (ТП) и б) от левой ТП **требуется**:

- 1) определить мощности на головных участках ВЛ СЦБ, рассчитать потокораспределение токов и мощностей по участкам сети;
- 2) проверить существующие сечения и марки проводов и кабелей по допустимым рабочим токам и по допустимой потере напряжения;
- 3) произвести расчет максимальной потери напряжения, т.е. потери напряжения от шин питающей подстанции до самой удаленной от ТП нагрузки;
- 4) на основании выполненных расчетов принять одну из ТП (правую или левую) в качестве источника основного питания ВЛ СЦБ, а оставшуюся ТП – в качестве источника резервного питания.

1. Краткие теоретические сведения

Электропитание и электроснабжение нетяговых потребителей имеет ряд специфических особенностей и осуществляется на основании технико-экономических расчетов с учетом требуемой надежности электроснабжения потребителей [1]. Устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), связи и вычислительной техники, входящие в состав систем обеспечения движения поездов, получают питание от воздушных и кабельных линий и устройств электроснабжения.

Устройства СЦБ относятся к потребителям I категории по надежности, которые должны обеспечиваться электрической энергией от двух независимых источников питания. Источники питания считают независимыми друг от друга в том случае, если отключение одного из них не влечет за собой отключение другого. Независимыми источниками считаются тяговые или районные подстанции, если напряжение от них к устройствам СЦБ подается по разным, непосредственно не связанным между собой линиям электропередачи (ЛЭП). В свою очередь, эти подстанции не должны иметь только один общий источник электроэнергии или зависеть от надежной работы только одной линии.

Согласно ПУЭ [2] переключение с одного источника питания при исчезновении на нем напряжения на другой источник для потребителей I категории должно производиться автоматически, при этом время перерыва в электроснабжении не должно превышать 1,3 с.

Таким образом, для обеспечения требований по надежности электроснабжения устройств СЦБ в настоящее время в схемах их электропитания предусматривают 2 независимых источника питания (основной и резервный), а при составлении схем электроснабжения – наличие двух линий – основной и резервной.

Основной линией для питания устройств СЦБ является трехфазная трехпроводная высоковольтная линия 6 или 10 кВ (ВЛ СЦБ 6 (10) кВ), расположенная вдоль железнодорожного пути на самостоятельных опорах или на опорах контактной сети. ВЛ СЦБ в некоторых литературных источниках также называют линией автоблокировки ВЛ СЦБ.

Схемы резервного питания устройств СЦБ различаются в зависимости от того, электрифицирован ли участок железной дороги или нет и на каком роде тока произведена электрификация этого участка. Так, на линиях с тепловой тягой (не электрифицированные участки железных дорог) и на участках, электрифицированных по системе постоянного тока, резервной линией для электроснабжения устройств СЦБ является трехфазная трехпроводная высоковольтная линия продольного электроснабжения (ВЛ ПЭ) напряжением 6 или 10 кВ.

Для участков железных дорог, электрифицированных по системе переменного тока, резервной линией для электроснабжения устройств СЦБ является система «два провода–рельс» (ДПР). В настоящее время на электрифицированных переменным током участках железных дорог РФ нашли широкое применение рельсовые цепи частотой 25 Гц, питаемые от обычных линий частотой 50 Гц, что позволяет достаточно просто осуществлять резервирование ВЛ СЦБ. Более подробное описание и основные схемы электропитания и электроснабжения устройств СЦБ приведены в [1, 20, 21].

Помимо высоких требований по надежности электропитания и электроснабжения устройств СЦБ, существующие нормативные документы довольно жестко регламентируют требования по уровню напряжения и по качеству напряжения (к примеру, по отклонению напряжения) в точках питания устройств СЦБ. Для правильного выбора и проверки элементов ВЛ СЦБ, а также для определения соответствия напряжения требованиям нормативных документов необходим электрический расчет ВЛ СЦБ.

Назначение, принцип и основные этапы электрического расчета ВЛ СЦБ. Методика электрического расчета ВЛ СЦБ представляет собой расчет разомкнутых распределительных электрических сетей 6÷35 кВ [3, 4, 6] для нормального установившегося режима.

Расчеты режимов электрических сетей ведут методом последовательных приближений, для сетей напряжением 6÷35 кВ ограничиваются первым приближением – определением наибольших потерь напряжения при условии, что напряжение во всех узловых точках сети равно номинальному. В большинстве случаев нагрузка в подобного рода расчетах представляется постоянными активной и реактивной мощностями.

На основании расчетной схемы и при известных значениях нагрузок рассчитывается распределение тока (или мощности) по участкам сети, исходя из этого определяется экономическое сечение проводника линии с последующим выбором сечения из стандартного ряда номинальных сечений проводника. Далее производится проверка выбранного сечения по условиям нагрева и проверка по потерям напряжения для сравнения с допустимыми нормами.

Таким образом, электрический расчет ВЛ СЦБ содержит основные этапы расчета и выбора (проверки) электрической аппаратуры [2]. К примеру, выбор сечений проводов ВЛ до 10 кВ и гибких кабелей производится по допустимому длительному току и допустимой потере напряжения [2, п. 7.7.14 и п. 7.7.27].

На основании этих расчетов могут быть также определены суммарные потери активной и реактивной мощности и потери электроэнергии за год.

Принимаемые допущения. При расчетах разомкнутых электрических сетей напряжением до 35 кВ принимают следующие допущения, не оказывающие существенного влияния на точность расчетов:

- трехфазная ВЛ СЦБ питает симметричную нагрузку, при этом достаточно рассмотреть только одну фазу линии, так как в остальных фазах токи и напряжения имеют те же значения, но со сдвигом на 120° ;

- емкостная и активная проводимость воздушных линий в схемах замещения не учитывается (считают их равными нулю). Схемы замещения состоят из последовательно соединенных активных и индуктивных сопротивлений. Емкость необходимо учитывать лишь в протяженных (более 100 км) кабельных сетях напряжением 6 кВ и выше;

- определяя ток нагрузки, предполагают, что напряжение в точке ее присоединения имеет номинальное значение. Это означает, что в расчетах таких сетей значение нагрузок потребителя считают независимым от режима напряжения, и поэтому нет принципиальной разницы между расчетами сети с нагрузками, заданными в токах или в мощностях;

- распределение потоков активной и реактивной мощностей в сети определяют без учета потерь мощности в элементах сети (это облегчает определение распределения потоков мощности по элементам сети);

- потери мощности и напряжения, а также токи в отдельных элементах сети определяют не по истинным напряжениям в узлах, а по номинальному напряжению сети;

- при определении мощности, передаваемой по участку распределительной сети, можно не учитывать потери в трансформаторах потребителей и в самой сети. Передаваемая мощность равна сумме нагрузок потребителей, питаемых по рассматриваемому участку;

- потерю напряжения принимают равной продольной составляющей падения напряжения.

Все эти упрощения не применяют в расчетах питающих высоковольтных сетей, где они могли бы привести к значительным погрешностям. Отметим еще тот факт, что при выполнении электрических расчетов удобнее применять линейные напряжения и трехфазные мощности вместо фазных.

Итак, основные **этапы электрического расчета ВЛ СЦБ**:

- на стадии **проектирования**
 - выбор напряжения и способа прокладки линии;
 - выбор марки и сечения проводов и кабелей;

– определение отклонения и потерь напряжения в узлах расчетной схемы, расчет напряжения в различных точках сети и на их основании принятие решения о выборе в качестве основного источника питания одной из смежных тяговых (трансформаторных) подстанций (как правило, смежная ТП в этом случае будет выбрана резервной);

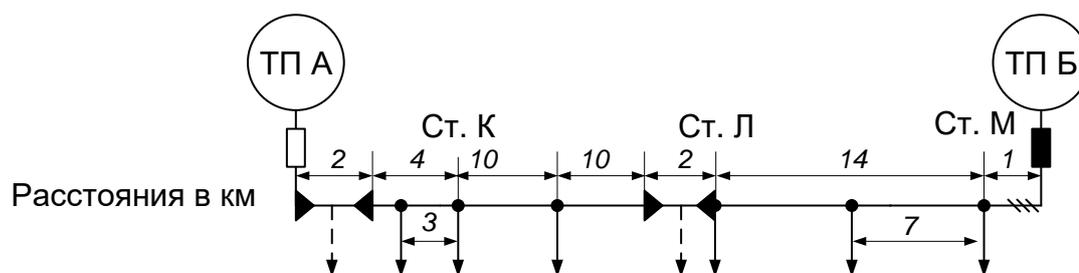
- на стадии **эксплуатации** ВЛ СЦБ, когда известно напряжение линии, а провода выбраны по условию механической прочности, задача электрического расчета сводится к проверке принятого сечения проводников на нагрев и по допустимой потере напряжения и оценке потерь напряжения в заданных узлах расчетной схемы, проверка правильности принятых решений относительно основной и резервной ТП.

Линии ВЛ СЦБ 6 (10), 35 кВ являются простейшими неразветвленными линиями, работающими нормально в режиме одностороннего (консольного) питания от одной ТП. К линиям подключается большое количество, как правило, однострансформаторных подстанций самой различной мощности: от однофазных мощностью 1,25÷10 кВА до трехфазных мощностью 25÷630 кВА и более. Наряду с этим линии характеризуются большой протяженностью при относительно малой плотности нагрузки, что и определяет ряд вводимых допущений при выполнении электрического расчета.

2. Порядок выполнения расчетов

Рассмотрим последовательность и общую методику проведения электрического расчета на конкретном примере.

Для трехфазной трехпроводной воздушной линии ВЛ СЦБ 10 кВ, выполненной проводом АС-35 с двумя участками кабельных вставок, выполненных кабелем ААБ 3×16, на основании расчетной схемы рис. 1, требуется произвести электрический расчет по известным мощностям станций и перегонов при известных расстояниях между расчетными точками нахождения нагрузок. Провода ВЛ СЦБ расположены на опоре по вершинам равностороннего треугольника на расстоянии 2 м друг от друга.



Активная мощность j-й нагрузки p_j , кВт	-	2,5	2,3	3,0	-	2,2	3,4	3,0
Реактивная мощность j-й нагрузки q_j , квар	-	2,1	1,6	2,4	-	1,7	2,75	2,65

Рис. 1. Исходные данные к электрическому расчету ВЛ СЦБ 10 кВ

Как показано на рис. 1, между питающими ТП А и ТП Б расположены три станции (Ст. К, Ст. Л и Ст. М), а также нагрузки станций и перегонов, которые заданы активными и реактивными мощностями и приведены в табличной форме на рис. 1. При обозначении нагрузок на расчетных схемах допускается, что суммарная нагрузка перегонов считается приложенной к их середине.

Основное питание ВЛ СЦБ осуществляется от правой ТП Б – на рис. 1 ее фидерный выключатель нормально включен. Смежная с ней ТП А осуществляет резервное (также одностороннее) питание ВЛ СЦБ – ее фидерный выключатель нормально отключен.

Произведем электрический расчет для двух вариантов расчетной схемы – при питании от ТП Б (по схеме рис. 1) и при питании от ТП А (изменяются на противоположные положения и обозначения фидерных выключателей ТП, направления протекания потоков тока и мощности).

В проектной практике вопрос о выборе трансформаторной подстанции для основного и резервного питания ВЛ СЦБ решается на основании расчетов потери напряжения в линии. В качестве основной питающей подстанции для данной фидерной зоны выбирается та подстанция, при питании от которой потеря напряжения в конце ВЛ СЦБ будет меньше.

Первый вариант. Питание ВЛ СЦБ от ТП А. Произведем расчет мощности на головном участке (от питающей ТП А до первой нагрузки, рис. 2). Протекание тока в направлении слева направо, т. е. от ТП А к ТП Б.

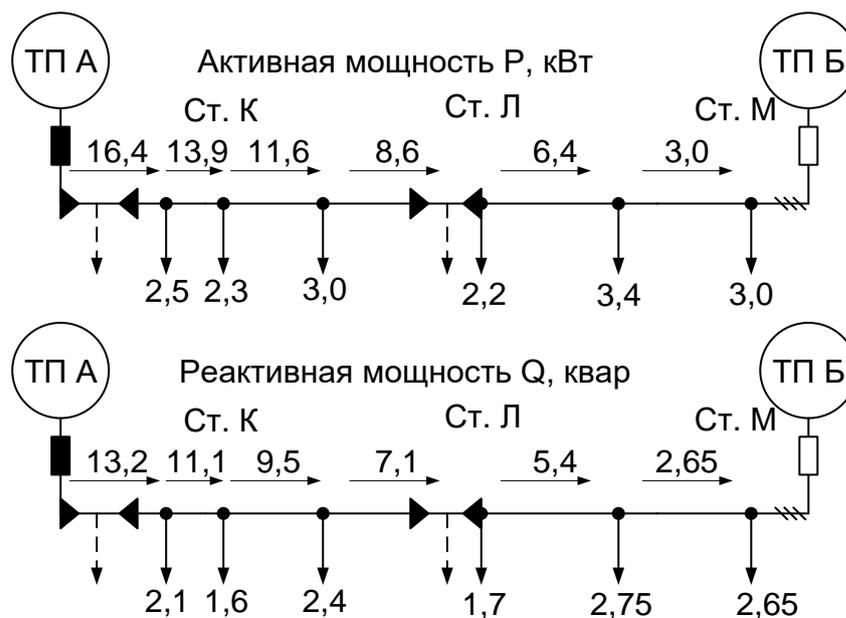


Рис. 2. К расчету потокораспределения мощностей при питании ВЛ СЦБ от ТП А

Мощности на головном участке сети от питающей ТП до первой нагрузки – активная $P_{ТП-1}$, кВА, и реактивная $Q_{ТП-1}$, квар, найдутся как сумма всех активных (реактивных) мощностей станций и перегонов:

$$P_{ТП-1} = \sum_{j=1}^N p_j; \quad Q_{ТП-1} = \sum_{j=1}^N q_j, \quad (1)$$

где p_j и q_j – активная и реактивная мощности j -й нагрузки перегонов и станций в соответствии с расчетной схемой питания.

Рассчитаем активную мощность на головном участке линии (от ТП А до первой нагрузки):

$$P_{ТП А-1} = 2,5 + 2,3 + 3,0 + 2,2 + 3,4 + 3,0 = 16,4 \text{ кВА};$$

$$Q_{ТП А-1} = 2,1 + 1,6 + 2,4 + 1,7 + 2,75 + 2,65 = 13,2 \text{ квар.}$$

Далее, путем последовательного вычитания величины мощности каждой последующей i -й нагрузки найдем мощности P_k , Q_k , протекающие по каждому k -му участку линии.

При правильном расчете распределения мощности по участкам сети с односторонним питанием мощность, протекающая по последнему, наиболее удаленному от ТП участку цепи (перед последней нагрузкой), будет равняться величине мощности этой нагрузки.

Произведем расчет токов по участкам сети, для чего вначале рассчитаем значения полной мощности S , кВА, по известным значениям активной мощности P , кВт, и реактивной Q , квар.

При известных значениях полной мощности S , кВА, на участках сети токи на этих же участках сети I , А, определяются по формуле

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} U_H}, \quad (2)$$

где U_H – номинальное напряжение сети. Для рассматриваемой ВЛ СЦБ $U_H = 10$ кВ.

Для головного участка расчетной схемы рис. 1 и 2 получаем:

$$S_{\text{ТПА-1}} = \sqrt{16,4^2 + 13,2^2} = 21,05 \text{ кВА}, \quad I_{\text{ТПА-1}} = \frac{21,05}{\sqrt{3} \cdot 10} = 1,2 \text{ А.}$$

Аналогично найдем токи по остальным участкам сети, и результат представим в виде рис. 3.

Таким образом, рассчитав токи по участкам сети, можно переходить к проверке существующих сечений и марок проводов и кабелей по допустимым рабочим токам. Согласно ПУЭ [2] проводники любого назначения должны удовлетворять требованиям в отношении предельно допустимого нагрева с учетом не только нормальных, но и послеаварийных режимов, а также режимов в период ремонта и возможных неравномерностей распределения токов между линиями, секциями шин и т. п. Иными словами, провода и кабели выбираются так, чтобы в расчетном режиме работы сети расчетный длительный ток для данного сечения и марки проводника был меньше нормируемого по ПУЭ.

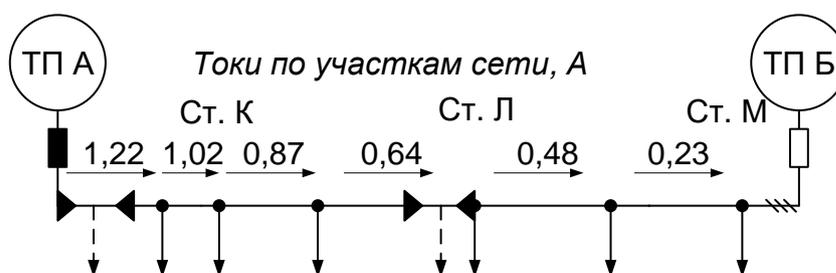


Рис. 3. К расчету потокораспределения токов по участкам ВЛ СЦБ

Провода воздушных линий являются одним из основных элементов устройств электроснабжения нетяговых потребителей. В настоящее время используются медные, алюминиевые, биметаллические, железные (стальные), которые должны обладать:

- высокой механической прочностью, что позволяет создавать необходимые натяжения, повышает ветроустойчивость, дает возможность выдерживать нагрузки от гололеда и ветра, исключает случаи свисания проводов;

- невысоким коэффициентом температурного удлинения, чтобы не вызывать больших изменений стрел провеса и быть атмосферостойкими;

- хорошей электропроводностью, что способствует снижению потерь электроэнергии в проводах ВЛ;

- хорошей нагревостойкостью (теплопроводностью), позволяющей материалу при высоких температурах сохранять прочность и твердость.

Сечение и марку проводов воздушных ВЛ принято обозначать буквенно-цифровым условным обозначением. Буквы указывают материал и конструкцию провода: М – медь, А – алюминий, С – сталь, ПБСМ – биметаллический сталемедный, АС – комбинированный сталеалюминиевый. Цифры указывают номинальную площадь сечения провода в квадратных миллиметрах. Например, АС-35 означает: провод сталеалюминиевый площадью сечения 35 мм².

Основные характеристики проводов и кабелей, используемых в схемах электроснабжения ВЛ СЦБ и линий продольного электроснабжения нетяговых потребителей, приведены в табл. 1–3 [1, 2, 20, 21].

Таблица 1

Допустимый длительный ток для неизолированных проводов по ГОСТ 839-80

Номинальное сечение, мм ²	Сечение (алюминий/сталь), мм ²	Ток, А, для проводов, прокладываемых вне помещений, марок		
		АС, АСКС, АСК, АСКП	М	А и АКП
10	10/1,8	84	95	–
16	16/2,7	111	133	105
25	25/4,2	142	183	136
35	35/6,2	175	223	170
50	50/8	210	275	215
70	70/11	265	337	265
95	95/16	330	422	320

Таблица 2

Допустимый длительный ток для неизолированных стальных проводов

Марка провода	Ток, А	Марка провода	Ток, А
ПСО-3	23	ПС-25	60
ПСО-3,5	26	ПС-35	75
ПСО-4	30	ПС-50	90
ПСО-5	35	ПС-70	125
		ПС-95	135

Таблица 3

**Характеристики кабелей с алюминиевыми жилами
с бумажной пропитанной маслоканифольной
и нестекающей массой изоляцией в свинцовой
или алюминиевой оболочке, прокладываемых в земле**

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Допустимый длительный ток, А, для трехжильных кабелей напряжением, кВ	
	6	10
10	60	–
16	80	75
25	105	90
35	125	115
50	155	140

С целью повышения надежности электроснабжения устройств СЦБ и других нетяговых потребителей для ВЛ 6–10 кВ в последнее время широко применяют самонесущие изолированные и защищенные провода (СИП), покрытые изолирующей оболочкой толщиной не менее 2–3 мм из атмосферостойкого светостабилизированного полиэтилена [1]. Технические характеристики проводов СИП-3 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики самонесущих изолированных проводов СИП -3

Марка провода	Номинальное сечение жилы, мм ²	Электрическое сопротивление постоянному току, Ом/км	Допустимый длительный ток, А	Односекундный ток КЗ, не более, кА
СИП-3 1×50	50	0,72	245	4,3
СИП-3 1×70	70	0,493	310	6,4
СИП-3 1×95	95	0,363	370	8,6
СИП-3 1×120	120	0,288	430	11,0

Произведем проверку по допустимому длительному току для нормального режима работы ВЛ СЦБ 10 кВ. Наибольшее расчетное значение тока, равное 1,2 А, протекает на участке от ТП А до первой нагрузки. На этом участке есть вставка кабелем марки ААБ 3×16, для которого допустимый длительный ток равен 75 А (табл. 3), что гораздо больше расчетного значения ($1,2 \ll 75$). Для провода марки АС-35 из табл. 1 допустимый длительный ток равен 175 А, что также гораздо больше расчетного значения ($1,2 \ll 175$). Таким образом, применяемые на рассматриваемом участке марки проводов воздушной и кабельных линий удовлетворяют условиям проверки по длительным рабочим токам в нормальном режиме работы.

Далее следует проверка сечения проводника q , мм^2 , по величине допустимой потери напряжения:

$$(\Delta U_{\text{пров}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб max}} \cdot L}{U_{\text{н}} \cdot \gamma \cdot q} \cdot 100\%) \leq 5\%, \quad (3)$$

где $I_{\text{раб max}}$ – максимальный рабочий ток проводника, А; L – длина проводника, м; γ – удельная проводимость провода, $\frac{\text{М}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$, для меди принимается равной $53 \frac{\text{М}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$, для алюминия – $32 \frac{\text{М}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$.

При невыполнении условия (3) сечение проводника следует увеличить, взяв его значение из номинального ряда.

Рассчитаем для кабельной линии для головного участка от ТП А до первой нагрузки с током 1,2 А, протекающим по участку длиной 2 км (см. рис. 3):

$$\left(\Delta U_{\text{кл}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,2 \cdot 2}{10 \cdot 10^3 \cdot 32 \cdot 16} \cdot 100\% \right) \ll 1\%.$$

В данном примере условие (3) выполняется также и для воздушной линии, выполненной проводом АС-35, так как имеется значительный запас по величине допустимого рабочего тока.

Активное сопротивление воздушных и кабельных линий, как известно, определяется материалом токоведущих проводников и их сечениями. Значения удельного (погонного) активного сопротивления r_0 для каждой марки провода или кабеля, как правило, принимают по таблицам, соответствующим передаче постоянного тока при температуре $+20$ °С согласно ГОСТ 839-80.

Удельное активное сопротивление r_0 , Ом/км, проводов и кабелей из цветных металлов определяется по одной из следующих формул:

$$r_0 = 1000 \frac{\rho}{q} \quad (4)$$

или

$$r_0 = \frac{1000}{\gamma \cdot q}, \quad (5)$$

где ρ – расчетное удельное сопротивление провода или жилы кабеля, $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; γ – расчетная удельная проводимость провода или жилы кабеля, $\text{м}/\text{Ом} \cdot \text{мм}^2$. Для меди $\gamma_{\text{м}} = 53 \text{ м}/\text{Ом} \cdot \text{мм}^2$, для алюминия $\gamma_{\text{ал}} = 32 \text{ м}/\text{Ом} \cdot \text{мм}^2$; q – номинальное сечение провода или кабеля, мм^2 .

Особым образом находят активное и индуктивное сопротивления стальных проводов, так как они непостоянны. Для стальных проводов активное и внутреннее индуктивное сопротивления зависят от

протекающего по проводу переменного тока. При увеличении тока по стальному проводу возрастает поверхностный эффект, а следовательно, увеличивается активное сопротивление провода. Активное сопротивление стальных проводов определяют по экспериментальным кривым или таблицам в зависимости от величины протекающего по ним тока.

В целом, активные сопротивления проводов из стали, меди, алюминия и сталеалюминиевых проводов приводят в справочниках согласно ГОСТ 839-80. К примеру, рассматриваемые в данной работе характеристики проводников приведены в виде таблиц в [1, 4–6, 8–21].

Индуктивное сопротивление зависит от взаимного расположения проводников, диаметра, магнитной проницаемости материала проводника и среды между проводниками разных фаз и частоты переменного тока.

Если линия трехфазного тока выполнена с перестановкой (транспозицией) проводов, то при частоте 50 Гц индуктивное сопротивление фазы на 1 км длины линии (удельное индуктивное сопротивление линии) можно определить по формуле

$$x_0 = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} + 0,0157, \quad (6)$$

где $D_{\text{ср}}$ – среднее геометрическое расстояние между осями проводов, м. $D_{\text{ср}}$ определяется номинальным напряжением линии с учетом конструкции подвеса проводов и расстояния между фазами $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3}$; $r_{\text{пр}}$ – радиус провода, принимаемый по таблицам ГОСТ 839-80 на провода, м.

Индуктивные сопротивления x_0 воздушных линий с проводами из цветного металла составляют в среднем $0,33 \div 0,42$ Ом/км.

Для кабельных линий при расчетах пользуются заводскими данными x_0 и r_0 из справочников (как, например, указанные в табл. 6.5), но для ориентировочных расчетов можно также пользоваться формулами (4)–(6).

Таблица 5

**Удельные активное и индуктивное сопротивления
трехжильных кабелей с поясной изоляцией**

Напряжение, кВ	Площадь сечения, мм ²						
	10	16	25	35	50	70	95
Индуктивное сопротивление x_0 , Ом/км							
6	0,110	0,102	0,091	0,087	0,063	0,08	0,078
10	0,122	0,113	0,099	0,096	0,090	0,086	0,083
Активное сопротивление r_0 , Ом/км							

Алюминиевая жила	3,1	1,94	1,24	0,89	0,62	0,443	0,326
Медная жила	1,84	1,15	0,74	0,52	0,37	0,26	0,194

В рассматриваемом примере для кабеля ААБ 3×16 найдем из табл. 6.5 удельное активное сопротивление r_0 при площади сечения 16 мм^2 с учетом алюминиевой жилы составит $r_0 = 1,94 \text{ Ом/км}$, а рассчитав по формуле (6), получим $r_0 = \frac{1000}{\gamma \cdot q} = \frac{1000}{32 \cdot 16} = 1,953 \text{ Ом/км}$. Погрешность при этом составила 0,66 %, что удовлетворяет требованиям инженерной точности. Индуктивное погонное сопротивление кабеля 10 кВ из табл. 5 $x_0 = 0,113 \text{ Ом/км}$.

Для воздушной линии, выполненной проводом АС-35, по формуле (4) удельное активное сопротивление $r_0 = 1000 \frac{\rho}{q} = 1000 \frac{0,0283}{35} = 0,808 \text{ Ом/км}$. При заданной конфигурации проводов на опоре среднее геометрическое расстояние между осями проводов составит $D_{\text{ср}} = 2 \text{ м}$. Найдем радиус провода АС-35 из [1, табл. 3.5] как половину от диаметра $r_{\text{пр}} = 4,2 \text{ мм}$. Индуктивное погонное сопротивление провода АС-35 по формуле (6) составит $x_0 = 0,1445 \cdot \lg \frac{2000}{4,2} + 0,0157 = 0,403 \text{ Ом/км}$.

Следующий этап электрического расчета – **расчет и оценка потерь напряжения по участкам цепи и в конце линии**. Методика расчета потерь напряжения в трехфазных линиях 6–35 кВ и принимаемые при этом допущения для линий электропитания и электроснабжения нетяговых потребителей подробно описаны в [20].

Важным при расчетах максимальной потери напряжения является то, на основании каких заданных величин производят расчет:

1) если потери напряжения вычисляют исходя из мощностей, протекающих по участкам линий P_k, Q_k , то в расчет берут сопротивления этих же участков R_k и X_k (участки между j -ми нагрузками);

2) если расчет потерь напряжения выполняют исходя из активных и реактивных нагрузок потребителей p_k, q_k , то следует применять сопротивление линий $R_{\text{ТП-}j}, X_{\text{ТП-}j}$ от начала линии (в данном случае, от шин тяговой подстанции) до точки присоединения рассматриваемой j -й нагрузки.

Так, если расчет будем вести по мощностям j -х нагрузок, то максимальная потеря напряжения $\Delta U, \text{ В}$, в сети ВЛ СЦБ определяется по формуле

$$\Delta U = \frac{1}{U_n} \left(\sum_{j=1}^n p_j \cdot R_{\text{ТП-}j} + \sum_{j=1}^n q_j \cdot X_{\text{ТП-}j} \right), \quad (7)$$

где p_j и q_j – активная, кВт, и реактивная, квар, мощности нагрузок; $R_{ТП-j}$ и $X_{ТП-j}$ – активное и индуктивное сопротивления линии от источника питания до точки приложения j -й нагрузки, Ом.

Если в расчет положим мощности, протекающие по k -му участку сети, то максимальная потеря напряжения ΔU , В, в сети

$$\Delta U = \frac{1}{U_H} \left(\sum_{k=1}^n P_k \cdot R_k + \sum_{k=1}^n Q_k \cdot X_k \right), \quad (8)$$

где P_k , Q_k – активная и реактивная мощности, протекающие по k -му участку сети; R_k и X_k – активное и индуктивное сопротивления k -го участка линии, Ом.

В практических расчетах более удобно выражать потерю напряжения в процентах от номинального напряжения линии:

$$\Delta U\% = \frac{100\% \cdot \Delta U}{U_H}. \quad (9)$$

Следует отметить, что в настоящее время согласно ПТЭ железных дорог РФ уровень напряжения на устройствах СЦБ не должен отклоняться на 5% выше номинального и на 10% ниже номинального [1].

Таким образом, для расчета потери напряжения далее необходимо задаться активными и реактивными сопротивлениями линии. Линии электросетей обладают активными и индуктивными сопротивлениями и активными и емкостными проводимостями, равномерно распределенными по их длине. Как было сказано выше, при расчетах электрических сетей напряжением до 35 кВ не учитывают активную и емкостную проводимости и применяют более простую схему замещения, состоящую из активного и индуктивного сопротивлений, соединенных последовательно.

Рассчитаем потери напряжения по формуле (6) при условии, что известны мощности по участкам сети. Представим для удобства расчетов схему на рис. 4.



Рис. 4. К расчету потерь напряжения в ВЛ СЦБ 10 кВ

По формуле (8) получим:

$$\Delta U = \frac{1}{10} ((16,4 \cdot 1,953 \cdot 2 + 16,4 \cdot 0,808 \cdot 1 + 13,9 \cdot 0,808 \cdot 3 + 11,6 \cdot 0,808 \cdot 10 + 8,6 \cdot 0,808 \cdot 10 + 8,6 \cdot 1,953 \cdot 2 + 6,4 \cdot 0,808 \cdot 7 + 3 \cdot 0,808 \cdot 7) + (13,2 \cdot 0,113 \cdot 2 + 13,2 \cdot 0,403 \cdot 1 + 11,1 \cdot 0,403 \cdot 3 + 9,5 \cdot 0,403 \cdot 10 + 7,1 \cdot 0,403 \cdot 10 + 7,1 \cdot 0,113 \cdot 2 + 5,4 \cdot 0,403 \cdot 7 + 2,65 \cdot 0,403 \cdot 7)) = 47,39 \text{ В.}$$

В процентах потеря напряжения составила 0,47 %, что удовлетворяет допустимому уровню потерь напряжения (менее нормируемых 10 %).

Для сравнения произведем расчет по формуле (6.7) по заданным мощностям нагрузок при питании линии от ТП А (активные и реактивные мощности нагрузок и расстояния от питающей ТП до каждой нагрузки взяты по рис. 1 и 2):

$$\Delta U_{\text{от ТП А}} = \frac{1}{10} ((2,5 \cdot 1,953 \cdot 2 + 2,5 \cdot 0,808 \cdot 3 + 2,3 \cdot 0,808 \cdot 6 + 3,0 \cdot 0,808 \cdot 16 + 2,2 \cdot 0,808 \cdot 26 + 2,2 \cdot 1,953 \cdot 28 + 3,4 \cdot 0,808 \cdot 35 + 3,0 \cdot 0,808 \cdot 42) + (2,1 \cdot 0,113 \cdot 2 + 2,1 \cdot 0,113 \cdot 3 + 1,6 \cdot 0,403 \cdot 6 + 2,4 \cdot 0,403 \cdot 16 + 1,7 \cdot 0,403 \cdot 26 + 1,7 \cdot 0,113 \cdot 28 + 2,75 \cdot 0,403 \cdot 35 + 2,65 \cdot 0,403 \cdot 42)) = 55,9 \text{ В.}$$

Как видим, при расчете потерь напряжения двумя способами (исходя из мощности нагрузок или из мощности, протекающей между точками приложения нагрузок) полученные значения различаются (в данном примере погрешность составила порядка 15%), тем не менее, считается, что обе расчетные методики равно применимы. Расчет по формуле (6.8) более трудоемок, так как нужно производить расчет распределения потоков мощности по участкам между нагрузками, но

на его основании производится проверка выбранного сечения проводов и кабелей на участках сети.

Рассчитаем потери напряжения при питании нагрузок от смежной ТП Б. Поскольку не рассчитывалось потокораспределение мощностей по участкам при питании от этой ТП, то расчет потерь напряжения удобнее вести по формуле (7) с использованием рис. 1 и 2:

$$\Delta U_{\text{от ТП Б}} = \frac{1}{10} ((3,0 \cdot 0,808 \cdot 1 + 3,4 \cdot 0,808 \cdot 8 + 2,2 \cdot 0,808 \cdot 15 + 3,0 \cdot 1,953 \cdot 17 + 3,0 \cdot 0,808 \cdot 27 + 2,3 \cdot 0,808 \cdot 37 + 2,5 \cdot 0,808 \cdot 40) + (2,65 \cdot 0,403 \cdot 1 + 2,75 \cdot 0,403 \cdot 8 + 1,7 \cdot 0,403 \cdot 15 + 2,4 \cdot 0,113 \cdot 17 + 2,4 \cdot 0,403 \cdot 27 + 1,6 \cdot 0,403 \cdot 37 + 2,1 \cdot 0,403 \cdot 40)) = 47,43 \text{ В.}$$

Как следует из полученных результатов расчета, потери напряжения при питании линии от ТП Б получились меньше, чем при питании линии от ТП А:

$$\Delta U_{\text{от ТП Б}} < \Delta U_{\text{от ТП А}}, \quad 47,43 < 55,9 \text{ (В).}$$

Следовательно, для рассматриваемой ВЛ СЦБ 10 кВ организовать основное питание от ТП Б целесообразнее, так как в этом случае достигаются меньшие потери напряжения на шинах самой удаленной от ТП нагрузки. Окончательно принимаем ТП Б в качестве источника основного питания ВЛ СЦБ, а ТП А – в качестве источника резервного питания.

3. Рекомендации по порядку выполнения контрольной работы

По заданной схеме расположения и мощности нагрузок в линии СЦБ для указанного класса напряжения (6 или 10 кВ) требуется произвести электрический расчет для двух вариантов питания ВЛ СЦБ – сначала от правой ТП, потом от левой ТП.

Последовательность расчета для каждого варианта питания:

1) составить расчетную схему, расставить и указать мощности нагрузок (аналогично рис. 1 или 2);

2) рассчитать по формуле (1) мощность на головном участке – от расчетной ТП до первой нагрузки;

3) рассчитать потокораспределение токов и мощностей по участкам сети, указать их на расчётной схеме, убедиться в правильности составления потокораспределения;

4) проверить заданные сечения и марки проводов и кабелей по допустимым рабочим токам и по допустимой потере напряжения по формулам (2), (3);

5) произвести расчет максимальной потери напряжения для всей сети, т. е. потери напряжения от шин питающей подстанции до самой

удаленной нагрузки по формулам (7) и (8) (в вольтах) и по формуле (9) (в процентах);

6) сравнить результаты, полученные расчетом, с нормами;

7) оценить погрешность расчета потери напряжения двумя методами;

8) повторить пункты 2–7 для условия питания ВЛ СЦБ от другой ТП;

9) построить для сравнения на одном рисунке в одном масштабе графические зависимости $\Delta U = f(L)$ для обоих вариантов питания;

10) на основании проделанных расчетов выбрать одну из подстанций в качестве источника основного питания ВЛ СЦБ, аргументировать свое решение;

11) результаты рассчитанных значений свести в общую **сводную таблицу**, вид, название и заполнение которой студенту надлежит разработать самостоятельно;

12) сделать краткие выводы по результатам выполнения работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электроснабжение нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Устройство, обслуживание, ремонт : учеб. пособие [Текст] / под ред. В.М. Долдина. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 304 с.

2. Правила устройства электроустановок [Текст] : [утв. Минэнерго Российской Федерации 08 июля 2002 г.]. – Изд. 7-е. – М. : СПб ДЕАН, 2009. – 701 с.

3. Конюхова, Е.А. Электроснабжение объектов : учеб. пособие [Текст] / Е.А. Конюхова. – 10-е изд., стер. – М. : Академия, 2013. – 320 с.

4. Сивков, А.А. Основы электроснабжения : учеб. пособие [Текст] / А.А. Сивков, Д.Ю. Герасимов, А.С. Сайгаш. – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – 180 с.

5. Производство, передача и распределение электрической энергии: электротехнический справочник [Текст]. В 4 т. Т. 3 / под общ. ред. профессора МЭИ В.Г. Герасимова (гл. ред. А.И. Попов). – 10-е изд., стер. – М. : Изд. дом МЭИ, 2009. – 597 с.

6. Кабышев, А.В. Расчет и проектирование систем электроснабжения: справочные материалы по электрооборудованию : учеб. пособие [Текст] / А.В. Кабышев, С.Г. Обухов. – Томск : Изд-во ТПУ 2005. – 168 с.

7. Игнатенко, И.В. Методическое руководство к структуре и оформлению курсовых и выпускных квалификационных работ : метод. указания [Текст] / И.В. Игнатенко, А.Ф. Титов. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2014. – 85 с.

8. Электронный ресурс. – Режим доступа : <http://www.biblem.narod.ru>
9. Электронный ресурс. – Режим доступа : <http://scbist.com>
10. Электронный ресурс. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com>
11. Электронный ресурс. – Режим доступа : <http://www.elec.ru>
12. Фёдоров, А.А. Электроснабжение промышленных предприятий : учебник для вузов [Текст] / А.А. Фёдоров, Э.М. Ристхейн. – М. : Энергия, 1981. – 360 с.
13. Электронный ресурс. – Режим доступа : <http://www.rus-trans.com>
14. Электронный ресурс. – Режим доступа : <http://www.nomek.ru>
15. Электронный ресурс. – Режим доступа : <http://ec74.tiu.ru>
16. Мельников, М.А. Электроснабжение промышленных предприятий : учеб. пособие [Текст] / М.А. Мельников. – Томск : Изд-во ТПУ, 2001. – 144 с.
17. Ус, А.Г. Электроснабжение промышленных предприятий и гражданских зданий : учеб. пособие [Текст] / А.Г. Ус, Л.И. Евминов. – Минск : НПООО «ПИОН», 2002. – 457 с.
18. Киреева, Э.А. Справочник электрика [Текст] / Э.А. Киреева, С.А. Цырука. – М. : Колос, 2007. – 464 с.
19. Шеховцов, В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование : учебник для вузов [Текст] / В.П. Шеховцов. – М. : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004. – 407 с.
20. Герман, Л.А. Устройства и линии электроснабжения автоблокировки [Текст] / Л.А. Герман, М.И. Векслер, И.А. Шелом. – М. : Транспорт, 1987. – 192 с.
21. Ратнер, М.П. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог [Текст] / М.П. Ратнер, Е.Л. Могилевский. – М. : Транспорт, 1985. – 295 с.
22. Грейсух, М.В. Расчеты по электроснабжению промышленных предприятий / М.В. Грейсух, С.С. Лазарев. – М. : Энергия, 1977. – 312 с.
23. Кабышев, А.В. Электроснабжение объектов. Ч. 1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования : учеб. пособие / А.В. Кабышев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 185 с.
24. Цигельман, И.Е. Электроснабжение гражданских зданий и коммунальных предприятий : учебник для электромех. специальностей техникумов / И.Е. Цигельман. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Высш. шк., 1988. – 319 с.
25. Электроснабжение промышленных предприятий : метод. указания к выпускной работе бакалавров для студентов направления 551700 «Электроэнергетика» [Текст] / сост. А.П. Гаврилин, С.Г. Обухов, С.П. Озга. – Томск : Изд-во ТПУ, 2001. – 94 с.
26. Липкин, Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок [Текст] / Б.Ю. Липкин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1990. – 360 с.

27. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий : учеб. для студ. высших учебных заведений / Б.И. Кудрин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2005. – 672 с.

28. Артемов, А.И. Электроснабжение промышленных предприятий в примерах и задачах / А.И. Артемов ; под ред. В.И. Минченкова. – Смоленск, 2000. – 300 с.

29. Федоров, А.А. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий : учеб. пособие для вузов / А.А. Федоров, Л.Е. Старкова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.