

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

П. В. Лычев, К. М. Медведев

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ПРАКТИКУМ

**по одноименному курсу для студентов
специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические
системы и сети» дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2012

УДК 621.311(075.8)
ББК 31.27я73
Л88

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 27.12.2011 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Теоретические основы электротехники» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *А. В. Козлов*

Лычев, П. В.

Л88

Электроэнергетические системы : практикум по одной дисциплине для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» днев. формы обучения / П. В. Лычев, К. М. Медведев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 46 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://alis.gstu.by/StartEK/>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-078-2.

Содержит программы проведения практических занятий, где рассматриваются задачи, позволяющие студентам закрепить знания по выбору номинального напряжения электрической сети, силовых трансформаторов на подстанциях, сечений проводников линий и регулировочных ответвлений трансформаторов в рамках основных разделов рабочей программы дисциплины «Электроэнергетические системы».

Для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» дневной формы обучения.

УДК 621.311(075.8)
ББК 31.27я73

ISBN 978-985-535-078-2

© Лычев П. В., Медведев К. М., 2012
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2012

Предисловие

Одним из итогов изучения дисциплины «Электроэнергетические системы» является умение студентов решать конкретные задачи в области основ их проектирования, выбора режимов регулирования напряжения и регулировочных ответвлений трансформаторов, снижения потерь мощности и электроэнергии.

В данном практикуме приведены программы проведения практических занятий, где рассматриваются конкретные задачи, а также материал для самостоятельной (контролируемой) работы студентов. Задачи с решениями по всем темам студенты имеют возможность проработать по учебному пособию [4].

В практикуме приведены возможные варианты экзаменационных задач.

Тема 1

ВЫБОР НОМИНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ И ТРАНСФОРМАТОРОВ

В результате изучения темы студент:

– **должен знать:** подходы к выбору номинального напряжения, систематические и аварийные перегрузки трансформаторов разных систем охлаждения, принципы выбора количества и мощности трансформаторов на понижающих подстанциях;

– **должен уметь:** выбирать номинальное напряжение и силовые трансформаторы в электрических сетях.

Студент обязан до практического занятия проработать материал данной темы по конспекту лекций и учебной литературе [1]–[3].

При этом он должен обратить внимание на сложившиеся шкалы номинальных напряжений в разных регионах, на сложности эксплуатации замкнутых сетей с разными номинальными напряжениями. При выборе трансформаторов – на преимущества двухобмоточных трансформаторов, на необходимость их загрузки в соответствии с ГОСТ.

1.1. Выбор номинальных напряжений

Номинальные напряжения электрических сетей общего назначения установлены действующим стандартом. Величина его определяется главным образом передаваемой мощностью и расстоянием передачи. Средние значения дальности передачи и величина пропускной способности воздушных линий напряжением 35–750 кВ приведены в табл. П.1.1.

Известен ряд попыток определить экономические зоны применения электропередач разных напряжений. Наиболее приемлемые результаты для всей шкалы номинальных напряжений от 35 кВ и выше дает эмпирическая формула, предложенная Г. А. Илларионовым:

$$U = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L} + \frac{2500}{P}}}, \text{ кВ}, \quad (1.1)$$

где P – активная мощность одной цепи электропередачи, МВт; L – длина электропередачи, км.

Известны и другие эмпирические формулы, например, Стилла:

$$U = 4,34 \sqrt{L + 16P}, \text{ кВ}. \quad (1.2)$$

В Беларуси получила распространение система напряжений 110–330–750 кВ. Напряжение 220 кВ чаще применяется в западных районах страны. Напряжение 35 кВ используется преимущественно в сельских сетях и считается малоперспективным. Для распределительных сетей рекомендуется напряжение 10 кВ, которое вытесняет напряжение 6 кВ.

Программа практического занятия

Для заданной схемы сети (рис. 1.1) и исходных данных (табл. 1.1) необходимо выбрать номинальные напряжения для каждого участка сети.

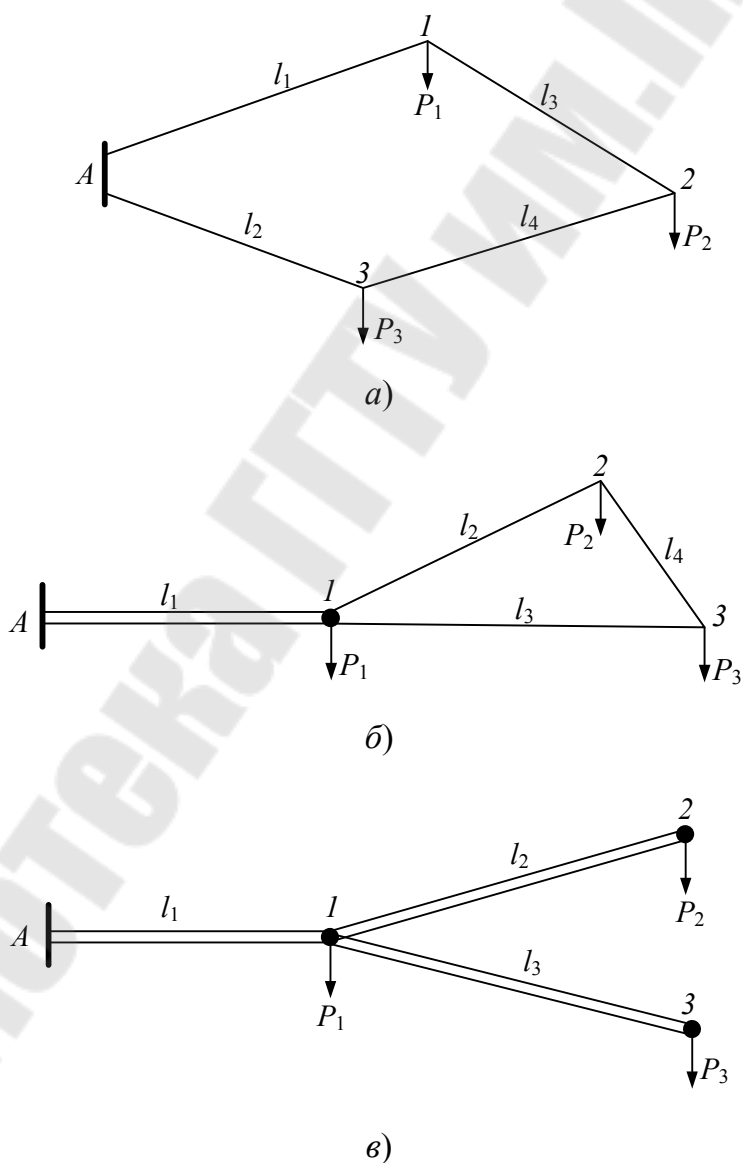


Рис. 1.1. Схемы сети для выбора номинальных напряжений и силовых трансформаторов

Исходные данные для выбора номинальных напряжений

Номер варианта	Мощности узлов нагрузки, МВт			Длины линий, км			
	1	2	3	l_1	l_2	l_3	l_4
1	30	20	25	20	25	30	29
2	62	40	37	60	43	34	38
3	83	102	94	80	125	94	79
4	16	8	12	15	20	10	10
5	97	38	55	63	45	38	60

Для решения поставленной задачи необходимо:

- найти мощность в каждой линии; при этом в замкнутой сети распределение мощностей находится в предположении, что сеть является однородной;
- определить напряжения в каждой линии по табл. П.1.1 и формулам (1.1) и (1.2);
- окончательно принять номинальные напряжения в каждой линии. При этом следует учесть, что в замкнутом контуре целесообразно иметь одно номинальное напряжение, так как для связи сетей разных номинальных напряжений потребуются трехобмоточные трансформаторы или автотрансформаторы.

Самостоятельная (контролируемая) работа студентов

Проработать задачи с решениями из § 4.1.2 [4] и для самостоятельной работы из § 4.1.3 [4], а также выбрать напряжения для других схем из рис. 1.1.

1.2. Выбор трансформаторов на понижающих подстанциях

Выбор трансформаторов включает выбор их количества и номинальной мощности.

Выбор количества трансформаторов главным образом зависит от требований к надежности электроснабжения питающихся от них потребителей. В практике проектирования на подстанциях рекомендуется, как правило, установка двух трансформаторов. Применение однострансформаторных подстанций допускается на первом этапе сооружения двухтрансформаторных подстанций при условии обеспече-

ния на данном этапе резервирования питания потребителей по сетям вторичного напряжения, а также для питания потребителей третьей категории надежности, если возможна замена поврежденного трансформатора в течение суток.

На двухтрансформаторной подстанции мощность трансформаторов выбирается так, чтобы при отключении наиболее мощного из них оставшийся обеспечил питание полной нагрузки с учетом допустимой перегрузки.

Установленная (номинальная) мощность S_T каждого трансформатора должна удовлетворять условиям:

$$S_T \geq \frac{S_{\text{нб}}}{n_T};$$
$$S_T \geq \frac{S_{\text{нб}} - S_{\text{рез}}}{k_{\text{ав}}(n_T - n_{\text{отк}})}, \quad (1.3)$$

где $S_{\text{нб}}$ – максимальная нагрузка подстанции в нормальном режиме; n_T – количество трансформаторов на подстанции; $n_{\text{отк}}$ – количество отключенных трансформаторов в аварийном режиме; $S_{\text{рез}}$ – часть нагрузки подстанции, резервируемая по сетям вторичного напряжения в аварийном режиме; $k_{\text{ав}}$ – допустимая перегрузка трансформатора в аварийном режиме.

Величины допустимых аварийных перегрузок трансформаторов $k_{\text{ав}}$ даны в ГОСТ 14209–97. Трансформаторы класса напряжения до 110 кВ включительно допускают перегрузку величиной 1,4 номинальной мощности. Поэтому из условий (1.3) на двухтрансформаторной подстанции без резервирования по сетям вторичного напряжения мощность каждого трансформатора принимается равной

$$S_T \geq \frac{S_{\text{нб}}}{1,4}. \quad (1.4)$$

Заметим, что в соответствии с техническими условиями автотрансформаторы допускают аварийную перегрузку величиной 1,2 от номинальной мощности автотрансформатора. При этом следует помнить, что мощность обмотки низшего напряжения автотрансформатора значительно меньше его номинальной мощности и дана в паспорте автотрансформатора.

Для одноторансформаторных подстанций мощность выбираемого трансформатора должна удовлетворять условию:

$$S_T \geq S_{нб}. \quad (1.5)$$

Во всех случаях при выборе марки трансформаторов необходимо также помнить, что на подстанциях, связывающих сети напряжением 35 кВ и выше и распределительные сети напряжением 10 кВ и ниже, должны устанавливаться трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой (с РПН).

Программа практического занятия

Для схемы электрической сети и исходных данных, на основании которых выбраны напряжения линий, с учетом дополнительных исходных данных (табл. 1.2) необходимо выбрать количество, мощности и тип трансформаторов во всех узлах нагрузки, имея в виду, что напряжение обмоток низшего напряжения должно соответствовать номинальному напряжению сети 10 кВ.

Таблица 1.2

Исходные данные для выбора трансформаторов

Номер варианта	Категория узла нагрузки по надежности электроснабжения		
	1	2	3
1	I	II	III
2	II	I	III
3	II	III	I
4	III	I	II
5	I	III	II
6	III	II	I

Для решения поставленной задачи необходимо:

– исходя из категории и мощности узлов нагрузки, питающихся от данной трансформаторной подстанции, выбрать количество трансформаторов;

– исходя из номинальных напряжений линий, необходимо наметить тип трансформатора для установки в каждом узле, оценить мощности, передаваемые по разным обмоткам, и по формулам (1.4) или (1.5) найти расчетную мощность трансформатора;

– по справочнику выбрать трансформаторы с требуемой номинальной мощностью $S_{\text{НОМ}}$ и нужного типа;

– рассчитать коэффициенты загрузки трансформаторов в нормальном $k_{\text{з.норм}}$ и послеаварийном $k_{\text{з.ав}}$ режимах:

$$k_{\text{з.норм}} = \frac{S_{\text{НБ}}}{n_{\text{T}} S_{\text{НОМ}}};$$
$$k_{\text{з.ав}} = \frac{S_{\text{НБ}}}{(n_{\text{T}} - 1) S_{\text{НОМ}}}, \quad (1.6)$$

где

$$S_{\text{НБ}} = \frac{P_{\text{НБ}}}{\cos \varphi}. \quad (1.7)$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ принять равным 0,9.

Самостоятельная (контролируемая) работа студентов

Проработать задачи с решениями из § 4.1.2 [4] и для самостоятельной работы из § 4.1.3.

Тема 2 ВЫБОР ПРОВОДНИКОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В результате изучения темы студент:

– **должен знать:** сущность и области применения всех условий выбора площади сечений проводников в линиях любого конструктивного исполнения и номинального напряжения;

– **должен уметь:** выбрать площадь сечения проводника в воздушных линиях разомкнутых и замкнутых электрических сетей любого напряжения, а также в кабельных, воздушных с изолированными и покрытыми проводами линиях напряжением 0,38–10 кВ.

Студент до практических занятий обязан проработать материал данной темы по конспекту лекций и учебной литературе [1]–[4]. При этом он должен обратить внимание на следующее.

Обычно площадь сечения проводника изначально выбирается по условию экономичности, но при окончательном принятии решения необходимо учитывать технические ограничения и область их распространения.

Условию экономичности отвечает выбор площади сечений проводников по нормированным значениям плотности тока.

К техническим ограничениям при выборе площади сечения проводника относятся нагрев проводников длительно допустимым током, допустимая потеря напряжения, механическая прочность проводника, возникновение короны на проводах воздушных линий, термическая стойкость изолированных проводников.

Рассмотрим принципы и особенности выбора или проверки площади сечений проводников по разным условиям и порядок выбора их в линиях любого конструктивного исполнения и номинального напряжения.

2.1. Выбор проводников по нормированным значениям плотности тока

При выборе проводников по нормированной плотности тока суммарное сечение фазы определяется по формуле

$$F = \frac{I_p}{J_n}, \quad (2.1)$$

где I_p – расчетный ток, А; J_n – нормированная плотность тока, А/мм².

Нормированные значения плотности тока приведены в табл. П.1.2. Расчетный ток определяется для нормального режима наибольших нагрузок рассматриваемой сети.

Программа практического занятия

Для заданной схемы электрической сети с воздушными линиями (рис. 2.1) и исходных данных (табл. 2.1) необходимо выбрать провода по нормированной плотности тока.

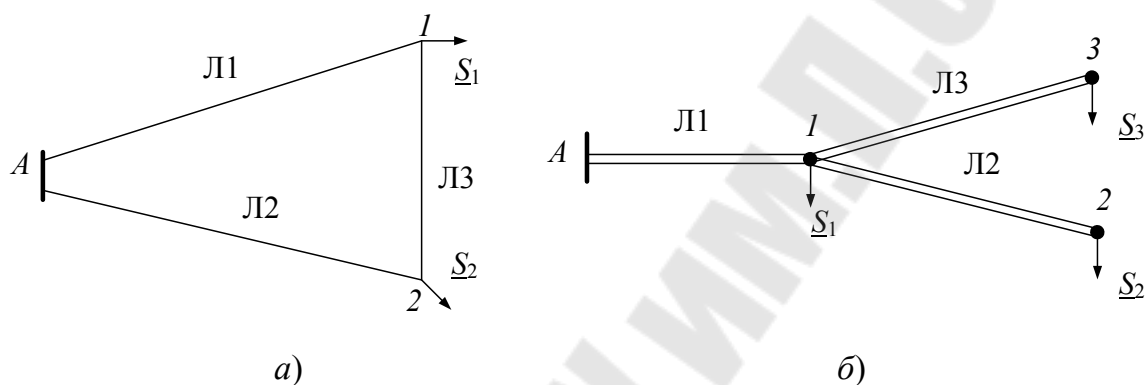


Рис. 2.1. Схемы сети для выбора сечений проводов воздушных линий

Для решения поставленной задачи необходимо:

- по заданным мощностям узлов нагрузки найти мощности S_{ij} на каждом участке линии и соответствующие им токи I_{ij} ;
- для каждого участка линии определить время использования наибольшей нагрузки $T_{нбij}$;
- исходя из материала выбираемого провода и величины $T_{нбij}$ по табл. П.1.2 найти нормированное значение плотности тока $J_{нij}$ для рассматриваемого участка линии;
- по формуле (2.1) для каждого участка рассчитать площадь сечения проводника фазы F_{ij} и выбрать марку провода из табл. П.1.4.

Таблица 2.1

Исходные данные для выбора сечений проводов воздушных линий

Номер варианта	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	Схема на рис. 2.1	Характеристики узлов нагрузки $\left(\frac{S, \text{МВ} \cdot \text{А}}{T_{\text{нб}}, \text{ч}} \right)$			Длины линий, км		
			1	2	3	Л1	Л2	Л3
1	110	<i>a</i>	$\frac{30 + j15}{5100}$	$\frac{25 + j16}{4600}$	–	30	20	15
2	110	<i>б</i>	$\frac{10 + j5}{4100}$	$\frac{21 + j11}{3200}$	$\frac{15 + j8}{5200}$	18	30	26
3	220	<i>a</i>	$\frac{60 + j30}{4400}$	$\frac{100 + j40}{5100}$	–	60	80	50
4	220	<i>б</i>	$\frac{80 + j30}{3800}$	$\frac{60 + j22}{4300}$	$\frac{100 + j50}{5100}$	100	60	40

**Самостоятельная (контролируемая)
работа студентов**

Выбрать сечение по нормированной плотности тока для другой схемы на рис. 2.1.

**2.2. Выбор проводников по условию нагревания
длительно допустимым током**

Проводники линий электропередачи любого назначения и исполнения должны удовлетворять условию нагревания длительно допустимым током:

$$I_{\text{нб}} \leq I_{\text{доп}}, \quad (2.2)$$

где $I_{\text{нб}}$ – наибольший ток, протекающий по выбираемому проводнику в нормальном или послеаварийном режимах; $I_{\text{доп}}$ – длительно допустимый ток для проводника данного вида и условий прокладки.

В зависимости от технических характеристик рассматриваемой сети сечение проводника в ней обязательно должно либо выбираться, либо проверяться по условию нагревания длительно допустимым током.

Во многих случаях сечение проводника изначально выбирается по нормированной плотности тока. Поэтому выбранное по ней сечение проводника должно быть проверено по нагреву длительно допус-

тимым током, т. е. удовлетворять условию (2.2). Если условие не выполняется, то сечение должно быть заменено на большее значение.

В линиях, например, номинальным напряжением до 1 кВ сечение проводника может изначально выбираться по данному условию. То есть длительно допустимый ток $I_{\text{доп}}$ для выбираемого проводника должен быть не меньше наибольшего тока $I_{\text{нб}}$, протекающего по нему в нормальном режиме.

Величина длительно допустимого тока проводника $I_{\text{доп}}$ данного сечения зависит от его вида, изоляции, условий прокладки и дается в справочниках (табл. П.1.8–П.1.15) для определенных нормированных условий прокладки, охлаждения и температуры проводника. Так, при прокладке в воздухе нормированной принимается температура окружающей среды +25 °С, а в земле или воде – +15 °С. Допустимая нормированная температура проводника зависит от вида изоляции изолированных проводов и кабелей и способа соединения проводов и не превышает +90 °С.

Если фактические условия прокладки и охлаждения отличаются от нормированных, то это учитывается соответствующими поправочными коэффициентами. Так, чтобы учесть влияние на работу проводника отличия фактической температуры окружающей среды от нормированной, введен поправочный коэффициент на температуру окружающей среды k_t (табл. П.1.16).

При прокладке нескольких кабелей в земле для учета их взаимного теплового воздействия необходимо учитывать поправочный коэффициент на количество работающих кабелей, лежащих рядом в земле k_n (табл. П.1.17). Этот коэффициент учитывается, как правило, для трехфазных кабелей с бумажной пропитанной изоляцией.

На период ликвидации послеаварийного режима для некоторых кабелей допускается перегрузка, которая может учитываться коэффициентом аварийной перегрузки $k_{\text{ав}}$. Так, для кабелей с бумажной изоляцией допускается перегрузка в течение 5 суток в пределах, указанных в табл. П.1.18. Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена допускается перегрузка до 17 % при прокладке в земле и до 20 % при прокладке в воздухе, а для кабелей из поливинилхлоридного пластика и полиэтилена – до 10 %.

Для учета действительных условий охлаждения, прокладки и режимов работы длительно допустимый ток $I_{\text{доп}}$, приведенный в спра-

вочных таблицах, должен быть скорректирован названными коэффициентами:

$$I_{\text{доп.р}} = I_{\text{доп}} k_t k_{\text{п}} k_{\text{ав}}. \quad (2.3)$$

Поэтому формула пригодности проводника по условию нагрева может быть записана в виде:

$$I_{\text{нб}} \leq I_{\text{доп.р}}. \quad (2.4)$$

Отметим некоторые особенности учета коэффициентов k_t , $k_{\text{п}}$ и $k_{\text{ав}}$.

Коэффициент $k_{\text{ав}}$ учитывается только при рассмотрении послеаварийных режимов. Коэффициент k_t , как правило, не учитывается при выборе голых проводов. Коэффициент $k_{\text{п}}$ учитывается только при прокладке кабелей в земле.

Порядок проверки сечений проводников по условию нагрева длительно допустимым током

Для выбранного сечения проводника в соответствующей ему справочной таблице необходимо найти длительно допустимый ток $I_{\text{доп}}$ для нормированных условий охлаждения и прокладки, который надо привести к фактическим условиям в соответствии с выражением (2.3). При этом выбираемые коэффициенты k_t , $k_{\text{п}}$ и $k_{\text{ав}}$ должны строго соответствовать рассматриваемому режиму – нормальному рабочему или послеаварийному.

В итоге должно быть доказано, что выполняется условие (2.4) как в нормальном, так и в послеаварийном режимах:

$$\begin{aligned} I_{\text{нб}}^{\text{норм}} &\leq I_{\text{доп.р}}^{\text{норм}}; \\ I_{\text{нб}}^{\text{ав}} &\leq I_{\text{доп.р}}^{\text{ав}}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Порядок выбора сечений проводников по условию нагрева длительно допустимым током

При выборе сечения проводника по данному условию надо найти наибольший ток, протекающий по нему в нормальном $I_{\text{нб}}^{\text{норм}}$ и послеаварийном $I_{\text{нб}}^{\text{ав}}$ режимах. Далее в зависимости от вида выбираемого проводника, условий прокладки и рассматриваемого режима

(нормальный или послеаварийный) выбираются поправочные коэффициенты k_t , k_{Π} и $k_{ав}$.

С учетом выражения (2.3) преобразуем формулу (2.4) к виду

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{нб}}}{k_t k_{\Pi} k_{ав}}. \quad (2.6)$$

По этой формуле рассчитываем допустимый ток в нормальном $I_{\text{доп}}^{\text{норм}}$ и послеаварийном $I_{\text{доп}}^{\text{ав}}$ режимах и по большему значению в соответствующей справочной таблице выбираем такое сечение, для которого длительно допустимый ток будет не меньше найденного по формуле (2.6).

Программа практического занятия

1. Проверить выбранное по нормированной плотности тока сечение проводов (рис. 2.1) по условию нагрева длительно допустимым током.

Для решения поставленной задачи необходимо:

– для выбранных сечений в справочной табл. П.1.8 найти значения $I_{\text{доп}}$;

– для каждой линии выбрать наиболее тяжелый послеаварийный режим, рассчитать для него ток $I_{\text{нб}}^{\text{ав}}$ и убедиться в выполнении условия (2.2). Если оно не выполняется, то надо выбрать провод большего сечения.

2. Потребитель мощностью $S_{\text{нб}}$ предполагается обеспечить электроэнергией по нескольким кабельным линиям напряжением 10 кВ, выполненным однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена и проложенными в заданной среде. Выбрать сечения кабелей по условию нагрева длительно допустимым током для одного из вариантов в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Исходные данные к задаче выбора сечений кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

Номер варианта	$S_{\text{нб}}$, МВ · А	Число кабелей	Материал проводника	Среда прокладки	Вид прокладки	cosφ	Длина, км
1	3,0	2	А	земля	горизонтальный	0,85	2,0
2	4,6	3	А	воздух	треугольный	0,9	2,5
3	1,5	2	М	земля	горизонтальный	0,87	3,7
4	5,6	3	М	воздух	треугольный	0,89	3,2

Для решения поставленной задачи необходимо:
– найти ток $I_{нб}$ (из двух режимов – нормального и послеаварийного – большее значение имеет ток в послеаварийном режиме $I_{нб}^{ав}$);
– с учетом поправочных коэффициентов $k_{п}$ и $k_{ав}$ по формуле (2.6) найти $I_{доп}$;
– в справочной табл. П.1.15 выбрать сечение, для которого табличный длительно допустимый ток не меньше найденного по формуле (2.6).

Самостоятельная (контролируемая) работа студентов

Проработать задачи 1–4 и 7 из § 4.2.2 и решить задачи 9 и 10 из § 4.2.3 [4].

2.3. Выбор проводников по допустимой потере напряжения

В электрических сетях напряжением 0,38–10 кВ выбранное или выбираемое сечение проводника должно удовлетворять условию

$$\Delta U_{нб} \leq \Delta U_{доп}, \quad (2.7)$$

где $\Delta U_{доп}$ – допустимая потеря напряжения; $\Delta U_{нб}$ – потеря напряжения в режиме наибольших нагрузок до наиболее удаленной точки сети.

Необходимость выполнения этого условия вызывается, во-первых, требованием обеспечения отклонений напряжений у подключенных к ним электроприемников в соответствии с ГОСТ 13109–97 и, во-вторых, существенным влиянием величины сечения проводника на потери напряжения из-за того, что, как правило, в этих сетях активное сопротивление больше реактивного.

В сетях напряжением 35 кВ и выше потери напряжения в меньшей степени зависят от сечения проводника, т. к. в них чаще $x_0 > r_0$. Да и более высокие потери напряжения в них экономически эффективнее компенсировать добавками напряжения трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой (с РПН), которые обязательны к установке между сетями с одной стороны напряжением 35 кВ и выше, а с другой стороны – напряжением 10 кВ и ниже.

Установленные действующим ГОСТ нормально допустимые отклонения напряжения на зажимах электроприемников составляют $\delta U_y = \pm 5\%$. Поэтому предельная величина допустимой потери напряжения не может превышать $\Delta U_{доп}^{пред} = 10\%$.

В реальных условиях с учетом дискретности регулирования напряжения трансформаторами этот параметр в сетях напряжением 6–10 кВ составляет $\Delta U_{\text{доп}} = (6-8) \%$, а в сетях напряжением 0,38 кВ еще меньше.

Порядок проверки сечений проводников по допустимой потере напряжения

Для выбранных сечений проводников из справочных таблиц надо найти действительные значения r_0 и x_0 , рассчитать потери напряжения до наиболее удаленной точки $\Delta U_{\text{нб}}$ и убедиться, что условие (2.7) выполняется. В противном случае надо увеличивать сечение на отдельных участках, добиваясь выполнения данного условия.

Порядок выбора сечений проводников по допустимой потере напряжения

При выборе сечений проводников по допустимой потере напряжения кроме выполнения основного условия (2.7) в зависимости от назначения сети могут приниматься во внимание дополнительные условия:

- неизменность сечения на всех участках линии $F = \text{const}$;
- минимум расхода проводникового материала $m_F = \text{min}$;
- минимум потерь активной мощности $\Delta P_{\Sigma} = \text{min}$.

Рассмотрим порядок выбора сечений проводников с учетом выполнения как основного, так и дополнительных условий.

Во всех случаях решение начинается с выбора средней величины удельного индуктивного сопротивления $x_{0\text{ср}}$, которое зависит от конструктивного исполнения линии и номинального напряжения.

Для разных линий рекомендуются следующие значения $x_{0\text{ср}}$, Ом/км: ВЛ 0,38 кВ – 0,29; ВЛ 6–10 кВ – 0,36; ВЛИ 0,38 кВ – 0,09; КЛ 0,38 кВ – 0,06; КЛ 6–10 кВ – 0,09; ВЛП 10 кВ – 0,3.

Определяется реактивная составляющая потери напряжения:

$$\Delta U_{\text{р}} = \frac{x_{0\text{ср}} \sum_{i=1}^n (Q_{i\text{л}} l_{i\text{л}})}{U_{\text{ном}}}, \quad (2.8)$$

где n – число участков линии; $Q_{iл}$ – реактивная мощность на i -м участке линии; $l_{iл}$ – длина i -го участка линии; $U_{ном}$ – номинальное напряжение линии.

Находится активная составляющая допустимой потери напряжения:

$$\Delta U_{а.доп} = \Delta U_{доп} - \Delta U_p. \quad (2.9)$$

Дальнейший порядок расчета зависит от дополнительного условия.

Для дополнительного условия $F = \text{const}$ сечение проводника находится по формуле

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{iл} l_{iл})}{\gamma \Delta U_{а.доп} U_{ном}}, \quad (2.10)$$

где γ – удельная проводимость материала проводника.

Для дополнительного условия $\Delta P_{\Sigma} = \text{min}$ вначале рассчитывается плотность тока, которая принимается одинаковой для всех участков линии:

$$J_{\Delta U} = \frac{\gamma \Delta U_{а.доп}}{\sqrt{3} \sum_{i=1}^n (\cos \varphi_{iл} l_{iл})}, \quad (2.11)$$

а затем для каждого участка линии определяется сечение проводника:

$$F_{iл} = \frac{I_{iл}}{J_{\Delta U}}, \quad (2.12)$$

где $I_{iл}$ – ток i -го участка линии.

Для дополнительного условия $m_F = \text{min}$ вначале находится коэффициент расхода материала проводников:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (l_{iл} \sqrt{P_{iл}})}{\gamma \Delta U_{а.доп} U_{ном}}, \quad (2.13)$$

а затем определяется сечение для каждого участка линии:

$$F_{iл} = k \sqrt{P_{iл}}. \quad (2.14)$$

Дальше независимо от дополнительных условий расчетные сечения проводников приводятся к стандартным $F_{ил.ст}$. Для них в справочных таблицах находятся действительные значения r_0 и x_0 и рассчитывается фактическая величина наибольшей потери напряжения:

$$\Delta U_{нб} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{ил} R_{ил}) + \sum_{i=1}^n (Q_{ил} X_{ил})}{U_{ном}}, \quad (2.15)$$

которая должна удовлетворять условию (2.7).

Программа практического занятия

1. Проверить сечение кабеля с изоляцией из СПЭ, выбранное в задаче 2 § 2.2, по допустимой потере напряжения $\Delta U_{доп} = 6\%$.

2. Для ВЛИ напряжением 380 В, выполненной проводом СИП-2 с изоляцией из СПЭ, выбрать по допустимой потере напряжения $\Delta U_{доп} = 4\%$ сечения алюминиевых проводов для схемы на рис. 2.2 и исходных данных, приведенных в табл. 2.3, с учетом одного из дополнительных условий: $F = \text{const}$ или $m_F = \text{min}$.

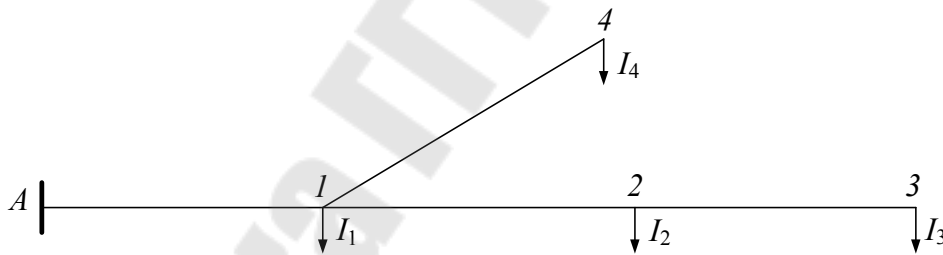


Рис. 2.2. Схема сети для выбора сечений проводов ВЛИ по допустимой потере напряжения

Таблица 2.3

Исходные данные к задаче выбора сечений проводов ВЛИ по допустимой потере напряжения

Номер варианта	Длины участков, м				Токи узлов, А и cosφ			
	А1	12	23	14	1	2	3	4
1	60	80	40	70	16/0,9	14/0,85	8/0,9	10/0,88

Самостоятельная (контролируемая) работа студентов

Проработать задачу 5 из § 4.2.2 [4]. Выбрать сечения проводников для задачи 2 из данного параграфа при ином дополнительном условии.

2.4. Выбор сечений проводников ВЛ по условию короны

По условию короны для ВЛ установлены минимально допустимые сечения проводов и конструкции фаз, которые могут применяться в ВЛ напряжением 110 кВ и выше (табл. П.1.20). Если сечение проводника первоначально выбранное, например, по нормированной плотности тока, оказалось меньше, то оно должно быть заменено и соответствовать табл. П.1.20.

Программа практического занятия

Для схемы на рис. 2.1 проверить, годятся ли выбранные по нормированной плотности тока и проверенные по нагреву длительно допустимым током провода по условию короны.

2.5. Выбор сечений проводников по механической прочности и термической стойкости

Для обеспечения соответствующего уровня надежности работы воздушных линий по условиям механической прочности в зависимости от климатических условий установлены минимально допустимые сечения проводов.

Так, в ВЛ напряжением до 1 кВ следует применять провода сечением не менее: алюминиевые – 16 мм^2 , сталеалюминиевые – 10 мм^2 . Для ВЛ напряжением более 1 кВ, как правило, необходимо применять сталеалюминиевые провода в районах с толщиной стенки гололеда до 10 мм сечением 35 мм^2 , 15 и 20 мм – 50 мм^2 , более 20 мм – 70 мм^2 .

На магистральных участках независимо от толщины стенки гололеда рекомендуется применять сталеалюминиевый провод сечением не менее 70 мм^2 .

Для ВЛИ напряжением 380 В по механической прочности в I и II районах по гололеду следует применять СИП с сечением несущего сталеалюминиевого нулевого провода не менее 70 мм^2 , на ответвлениях от магистрали в I и II районах по гололеду не менее 35 мм^2 , в III и IV районах – 50 мм^2 .

Провода ВЛИ, ВЛП и кабельные линии должны проверяться по термической стойкости к действию токов короткого замыкания (КЗ), т. е. выбранная площадь сечения проводников должна удовлетворять условию:

$$F \geq I_{\text{КЗ}} \frac{\sqrt{t}}{C}, \text{ мм}^2, \quad (2.16)$$

где $I_{\text{КЗ}}$ – действующее значение установившегося тока КЗ, А; t – время прохождения тока КЗ, с; C – коэффициент, зависящий от термической стойкости изоляции.

Значения $I_{\text{КЗ}}$ для ВЛИ и ВЛП даны в табл. П.1.9–П.1.11. Для кабелей с изоляцией из СПЭ – в табл. П.1.19.

Коэффициент C для алюминиевых проводов с изоляцией из термопластичного полиэтилена равен 59, для алюминиевых проводов и кабелей с изоляцией из СПЭ – 97, для кабелей с ПВХ-изоляцией – 75, с полиэтиленовой изоляцией – 62.

Программа практического занятия

1. Проверить выбранные в § 2.2 кабели с изоляцией из СПЭ на термическую стойкость.
2. Проверить выбранные в задаче 2 § 2.3 провода СИП на механическую прочность и термическую стойкость.

2.6. Выбор сечений проводников в сетях разного конструктивного исполнения и напряжения

Для любой линии электропередачи сечение проводника считается выбранным, если удовлетворяет всем требуемым условиям в соответствии с табл. 2.4.

Таблица 2.4

Условия выбора сечений проводников для разных линий

Вид линии	Условие выбора					
	J_n	$I_{\text{доп}}$	$\Delta U_{\text{доп}}$	Корона	Механическая прочность	Термическая стойкость
ВЛ 380 В	–	+	+	–	+	–
ВЛИ 380 В	–	+	+	–	+	+
ВЛ 6–10 кВ	+	+	+	–	+	–
ВЛП 10 кВ	+	+	+	–	+	+

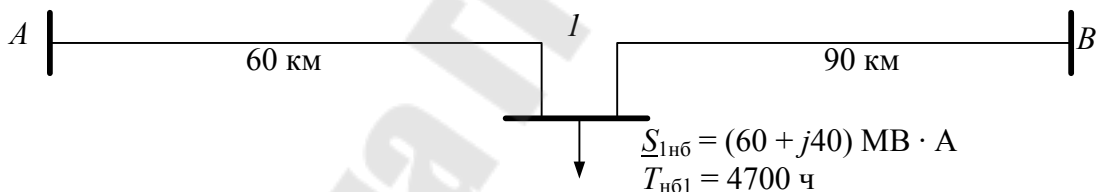
Вид линии	Условие выбора					
	J_n	$I_{\text{доп}}$	$\Delta U_{\text{доп}}$	Корона	Механическая прочность	Термическая стойкость
КЛ 380 В	–	+	+	–	–	+
КЛ 6–10 кВ	+	+	+	–	–	+
ВЛ 35 кВ	+	+	–	–	+	–
ВЛ от 110 кВ	+	+	–	+	–	–

При этом приоритетными условиями, по которым изначально выбираются сечения для разных линий, являются: нормированная плотность тока – для ВЛ напряжением 6 кВ и выше, КЛ напряжением 6 и 10 кВ и ВЛП напряжением 10 кВ; условие нагрева длительно допустимым током – для ВЛ и КЛ напряжением 380 В.

Программа практического занятия

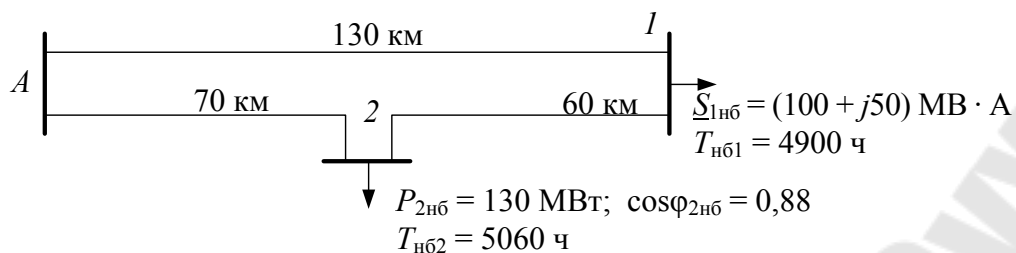
Выбрать сечения проводников для одного из ниже следующих вариантов линий и исходных данных:

1. Для представленной сети с двухсторонним питанием с линиями напряжением 220 кВ выбрать сечения проводников.



2. Супермаркет расчетной мощностью $P_p = 130 \text{ кВт}$ и $\cos\varphi = 0,85$ предполагается запитать от ТП-10/0,4 кВ, расположенной от него на расстоянии $l = 50 \text{ м}$, по двум кабельным линиям напряжением 380 В с алюминиевыми жилами с изоляцией из ПВХ, проложенным в земле. Выбрать сечение кабелей.

3. Выбрать число и сечение проводников воздушных линий напряжением 330 кВ.



4. Улицу с коттеджной односторонней застройкой на 12 домов протяженностью 380 м и расчетной нагрузкой коттеджа 10 кВт и $\cos\varphi = 0,9$ предполагается запитать по ВЛИ напряжением 380 В с изоляцией из термопластичного полиэтилена. Выбрать марку и сечение проводников СИП.

**Самостоятельная (контролируемая)
работа студентов**

Решить другие варианты задач.

Проработать задачи с решениями из § 4.2.2 [4].

Тема 3

ВЫБОР И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В результате изучения темы студент:

– *должен знать*: технические характеристики, возможности и области применения средств регулирования напряжения; задачи и принципы регулирования напряжения в системообразующей, питающей и распределительной сети; законы регулирования напряжения;

– *должен уметь*: выбрать нужное регулировочное ответвление любого трансформатора для обеспечения требуемых напряжений в электрической сети при решении задач оптимизации режима и обеспечения качества напряжения; определять фактическую величину напряжения в узлах электрической сети при выбранных (заданных) регулировочных ответвлениях трансформаторов.

Студент обязан до практических занятий проработать материал данной темы по конспекту лекций и учебной литературе [1]–[3].

При этом он должен обратить внимание на особенности и возможности различных трансформаторов как средств регулирования напряжения и на принципиальные отличия выбора регулировочных ответвлений для трансформаторов с устройством регулирования под нагрузкой (с РПН) и без него, т. е. без возбуждения (с ПБВ).

Устройство ПБВ не может обеспечить встречное регулирование напряжения, когда нагрузка и, значит, напряжение меняется в течение суток, а осуществлять переключения ответвлений ПБВ часто заведомо невозможно из-за необходимости отключения нагрузки.

Устройства ПБВ применяются в трансформаторах малой и средней мощности на напряжения 6 и 10 кВ, а также на стороне среднего напряжения (СН) трехобмоточных трансформаторов, у которых в обмотке высшего напряжения (ВН) имеется устройство РПН.

В двух- и трехобмоточных трансформаторах регулировочные ответвления РПН размещаются, как правило, на стороне ВН в нейтрали, а в автотрансформаторах – на стороне СН или в общей части гальванически связанных обмоток (в нейтрали).

Технические характеристики устройств регулирования напряжения различных трансформаторов приведены в [7].

3.1. Выбор регулировочных ответвлений для трансформаторов с РПН

Устройство РПН имеют практически все трансформаторы, у которых обмотка ВН имеет величину не менее 35 кВ. Для них регулировочное ответвление выбирается отдельно для каждого характерного режима (нормального наибольших и наименьших нагрузок и послеаварийного). При этом они являются основным средством, обеспечивающим встречный закон регулирования напряжения, при котором с увеличением нагрузки надо повышать напряжение на шинах низшего напряжения (НН). В режиме наибольших нагрузок оно должно быть не ниже 105 % номинального напряжения сети, а в режиме наименьших нагрузок – не выше номинального.

Для выбора ответвлений в двухобмоточном трансформаторе вначале определяется напряжение на стороне НН, приведенное к обмотке ВН (U_2^B).

Например, без учета поперечной составляющей падения напряжения:

$$U_2^B = U_1 - \frac{P_T^H R_T + Q_T^H X_T}{U_1}, \quad (3.1)$$

где P_T^H и Q_T^H – мощность на входе трансформатора за вычетом потерь холостого хода ΔS_x ; U_1 – подведенное к обмотке ВН напряжение.

Затем рассчитывается ответвление трансформатора, которое должно обеспечить требуемое желаемое напряжение $U_{2ж}$:

$$U_{отв} = \frac{U_2^B}{U_{2ж}} U_{н.ном}, \quad (3.2)$$

где $U_{н.ном}$ – номинальное напряжение обмотки НН.

В соответствии с техническими характеристиками трансформатора как регулятора напряжения и расчетным значением $U_{отв}$ выбирается стандартное ответвление $U_{отв.ст}$ и по следующей формуле определяется действительное напряжение

$$U_{2д} = \frac{U_2^B}{U_{отв.ст}} U_{н.ном}. \quad (3.3)$$

Программа практического занятия

Для одного из вариантов (табл. 3.1) выбрать регулировочные от-
ветвления трансформатора для обеспечения на шинах НН в режимах
наибольших (нб) и наименьших (нм) нагрузок напряжений

$$U_{2ж}^{нб} = 1,05 U_{ном.сети} \text{ и } U_{2ж}^{нм} = U_{ном.сети}.$$

Таблица 3.1

Исходные данные для выбора ответвлений трансформаторов с РПН

Номер варианта	Марка трансформатора	Подведенные к обмотке ВН			
		напряжение, кВ, в режиме		мощность, МВ · А, в режиме	
		нб	нм	нб	нм
1	ТМН-1000/35	36,4	35,6	$0,6 + j0,4$	$0,6 + j0,4$
2	ТДН-16000/110	116	113	$12 + j4,5$	$7 + j3$
3	ТРДН-32000/220	232	224	$28 + j13$	$14 + j5$

Для решения поставленной задачи необходимо:

– рассчитать приведенное к обмотке ВН напряжение на шинах
НН $U_2^В$;

– определить расчетное регулировочное ответвление $U_{отв}$, обес-
печивающее $U_{2ж}$;

– исходя из регулировочных возможностей трансформатора вы-
брать стандартное ответвление $U_{отв.ст}$;

– найти действительное напряжение на шинах НН $U_{2д}$ и сделать
вывод о достаточности диапазона регулирования напряжения транс-
форматора для обеспечения $U_{2ж}$.

Самостоятельная (контролируемая) работа студентов

Проработать задачи с решениями из § 4.3.2 [4] и для самостоя-
тельной работы из § 4.3.3 [4].

Обратить внимание, что в трехобмоточном трансформаторе уст-
ройство РПН в первую очередь используется для обеспечения нужно-
го напряжения на шинах НН.

1. На подстанции установлен автотрансформатор АТДЦТН-
125000/330/110. Подведенные к обмотке ВН мощность и напряжение
соответственно равны $\underline{S}_В = (90 + j50) \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $U_В = 335 \text{ кВ}$. Нагруз-

ка со стороны обмотки НН отсутствует. Выбрать ответвление трансформатора для обеспечения на шинах СН $U_{с.ж} = 118$ кВ.

2. На подстанции установлен трехобмоточный трансформатор ТДТН-40000/220. Подведенные к обмотке ВН мощность и напряжение в режимах наибольших и наименьших нагрузок равны соответственно $\underline{S}_B^{НБ} = (34 + j20)$ МВ·А, $\underline{S}_B^{НМ} = (20 + j12)$ МВ·А; $U_B^{НБ} = 228$ кВ и $U_B^{НМ} = 225$ кВ. К шинам НН подключена нагрузка $\underline{S}_H^{НБ} = (18 + j8)$ МВ·А и $\underline{S}_H^{НМ} = (12 + j5)$ МВ·А. Выбрать ответвления устройства РПН трансформатора для обеспечения напряжения на шинах НН $U_H^{НБ} = 6,4$ кВ и $U_H^{НМ} = 6,1$ кВ.

3.2. Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов с ПБВ

Для данных трансформаторов процесс переключения ответвлений связан с отключением нагрузки потребителей, поэтому здесь выбирается одно ответвление для всей совокупности нормальных режимов, включая режимы с наибольшими и наименьшими нагрузками.

Для выбора ответвления ПБВ в двухобмоточном трансформаторе вначале по формулам, аналогичным (3.1), определяют $U_{2НБ}^B$ и $U_{2НМ}^B$ соответственно для режимов наибольших и наименьших нагрузок. Потом находят требуемое регулировочное ответвление по формуле

$$U_{отв} = \frac{U_{2НБ}^B + U_{2НМ}^B}{2U_{2ж}} U_{н.ном}, \quad (3.4)$$

приводят его к стандартному значению $U_{отв.ст}$ и по формулам, аналогичным (3.3), находят действительные напряжения в характерных режимах. Эти напряжения в итоге должны обеспечить на зажимах электроприемников отклонения напряжения, соответствующие нормам.

В трехобмоточных трансформаторах устройство ПБВ находится со стороны обмотки СН и выбор его регулировочного ответвления осуществляется с учетом выбранных ответвлений устройства РПН, находящегося в обмотке ВН, по формуле

$$U_{отв.с} = \frac{U_{отв.ст.в}^{НБ} + U_{отв.ст.в}^{НМ}}{U_{с.нб}^B + U_{с.нм}^B} U_{с.ж}. \quad (3.5)$$

Программа практического занятия

1. Для одного из вариантов (табл. 3.2) выбрать регулировочное ответвление трансформатора для обеспечения на шинах НН $U_{2ж} = 1,03 U_{ном.сети}$.

Таблица 3.2

Исходные данные для выбора ответвлений трансформаторов с ПБВ

Номер варианта	Марка трансформатора	Подведенные к обмотке ВН			
		напряжение, кВ, в режиме		мощность, кВ · А, в режиме	
		нб	нм	нб	нм
1	ТМ-100/10	10,4	10,2	$60 + j20$	$40 + j15$
2	ТМ-630/6	6,3	6,1	$430 + j190$	$300 + j130$

Для решения поставленной задачи необходимо:

- рассчитать приведенные к обмотке ВН напряжения на шинах НН $U_{2нб}^В$ и $U_{2нм}^В$;
- по формуле (3.4) рассчитать $U_{отв}$;
- исходя из регулировочных возможностей трансформатора выбрать $U_{отв.ст}$;
- найти действительные напряжения на шинах НН $U_{2д}^{нб}$ и $U_{2д}^{нм}$.

2. Для задачи 2 из п. 3.1 дополнительно к выбранным ответвлениям устройства РПН выбрать ответвление устройства ПБВ, обеспечивающее на шинах СН $U_{с.ж} = 36,5$ кВ.

Самостоятельная (контролируемая) работа студентов

Проработать задачи с решениями из § 4.3.2 [4] и для самостоятельной работы из § 4.3.3 [4].

Решить следующую задачу.

К трехобмоточному трансформатору ТДТН-25000/220 подведено напряжение $U_B = 232$ кВ. Нагрузки со стороны СН и НН соответственно равны $\underline{S}_c = (10 + j5)$ МВ · А и $\underline{S}_н = (10 + j4)$ МВ · А. Трансформатор работает с регулировочными ответвлениями РПН (+1×1,0 %) и ПБВ (−1×2,5 %). Определить напряжение на шинах СН и НН.

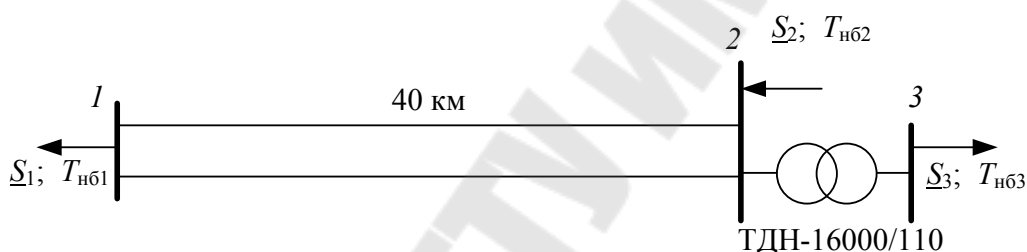
ВАРИАНТЫ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ ЗАДАЧ

В экзаменационном билете предлагается электрическая сеть (возможные варианты представлены ниже в таблице), состоящая из линий любого конструктивного исполнения и номинального напряжения и разных типов трансформаторов с заданными мощностями во всех (или части) узлах нагрузки и/или источника питания, а также напряжением в узле нагрузки или источника питания.

В задаче студент должен:

- выбрать площадь сечения проводника в заданной линии;
- выбрать ответвление трансформатора для обеспечения в узле нагрузки заданного желаемого напряжения или определить напряжение в заданном узле, если трансформатор работает на определенном регулировочном ответвлении.

Пример экзаменационной задачи



В приведенной на рисунке схеме электрической сети:

1. Дано: $S_2 = (60 + j30) \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $T_{\text{нб}2} = 4800 \text{ ч}$;
 $P_3 = 12 \text{ МВт}$; $\cos \varphi_3 = 0,9$; $T_{\text{нб}3} = 4700 \text{ ч}$;
 $U_2 = 114 \text{ кВ}$.

Требуется:

- выбрать провода в линии $I2$;
- выбрать ответвление трансформатора для обеспечения в узле 3 напряжения $U_{3\text{жел}} = 10,4 \text{ кВ}$.

2. Дано: $P_1 = 40 \text{ МВт}$; $\cos \varphi_1 = 0,88$; $T_{\text{нб}1} = 4600 \text{ ч}$;
 $S_2 = 60 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $\cos \varphi_2 = 0,88$; $T_{\text{нб}2} = 4900 \text{ ч}$;
 $U_2 = 120 \text{ кВ}$.

Требуется:

- выбрать провода в линии $I2$;
- найти напряжение в узле 3 при заданном напряжении в узле 1, если трансформатор работает на регулировочном ответвлении $+1,78 \%$.

**Варианты схем электрической сети
для экзаменационных задач**

Номер варианта	Схема сети
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Литература

1. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети : учебник / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. – Минск : Технопринт, 2004.
2. Идельчик, И. В. Электрические системы и сети / И. В. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989.
3. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов н/Д : Феникс ; Красноярск : Издат. проекты, 2006.
4. Лычев, П. В. Электрические системы и сети. Решение практических задач / П. В. Лычев, В. Т. Федин. – Минск : Дизайн ПРО, 1997.
5. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : НЦ ЭНАС, 2006.
6. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. – М. : Энергоатомиздат, 1985.
7. Лычев, П. В. Электрические системы и сети : пособие по курсовому и диплом. проектированию / П. В. Лычев, О. М. Головач. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Справочные данные

Таблица П.1.1

Пропускная способность линий

Напряжение, кВ	Сечение фазы, мм ²	Пропускная способность, МВт, при плотности тока 0,9 А/мм ²	Длина линии, км	
			предельная (КПД = 0,9)	средняя
35	70–150	3,6–9	25	8
110	70–240	11–37	80	25
220	240–400	74–123	400	100
330	2×240–2×400	221–368	700	130
500	3×330–3×500	630–1064	1200	280
750	5×300–5×400	1588–2117	2200	300

Таблица П.1.2

Нормированные значения плотности тока

Проводники	Плотность тока, А/мм ² , при числе часов использования максимума нагрузки, $T_{пб}$, ч/год		
	более 1000 до 3000	более 3000 до 5000	более 5000
Неизолированные провода и шины: медные	2,0	1,7	1,4
	алюминиевые	1,0	0,9
Кабели с бумажной, резиновой и поливинилхлоридной изоляцией с жилами: медными	2,4	2,0	1,6
	алюминиевыми	1,3	1,1
Кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией с жилами: медными	2,8	2,5	2,2
	алюминиевыми	1,5	1,4

**Расчетные данные проводов марки А и проводов
из алюминиевого сплава марок АН, АЖ**

Номинальное сечение, мм ² (алюминий/ сталь)	Число проволок, шт.	Номинальный диаметр проволок, мм	Расчетные данные провода			
			сечение, мм ²	диаметр провода, мм	сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км	
А:	50	7	3	49,5	9	0,558
	70	7	3,55	69,3	10,7	0,42
	95	7	4,1	92,4	12,3	0,315
	120	19	2,8	117,0	14	0,251
	150	19	3,15	148,0	15,8	0,197
	185	19	3,5	182,8	17,5	0,161
	240	19	4	238,7	20	0,123
	300	37	3,15	288,3	22,1	0,102
	400	37	3,66	389,2	25,6	0,075
	500	37	4,15	500,4	29,1	0,05
	600	61	3,5	586,8	31,5	0,05
	700	61	3,8	691,7	34,2	0,043
800	61	4,1	805,2	36,9	0,036	
АН:	50	7	3	49,5	9	0,624
	120	19	2,8	117,0	14	0,266
	150	19	3,15	148,0	15,8	0,211
	185	19	3,5	182,3	17,5	0,171
АЖ:	50	7	3	49,5	9	0,676
	120	19	2,8	117,0	14	0,288
	150	19	3,15	148,0	15,8	0,229
	185	19	3,5	182,3	17,5	0,185

Расчетные данные сталеалюминиевых проводов марок АС, АСК

Номинальное сечение, мм ² (алюминий/ сталь)	Алюминиевая часть провода		Расчетные данные провода			
	Число проволок	Диаметр проволок, мм	Сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км	Диаметр провода, мм	Сечение, мм ²	
					алюминия	стали
35/6,2	6	2,8	0,777	8,4	36,9	6,15
50/8		3,2	0,595	9,6	48,2	8,04
70/11		3,8	0,422	11,4	68	11,3
95/16		4,5	0,301	13,5	95,4	15,9
120/19*	26	2,4	0,244	15,2	118	18,8
150/24*	26	2,7	0,204	17,1	148	24,2
185/29*	26	2,98	0,159	18,8	181	29
185/43	30	2,8	0,156	19,6	185	43,1
240/32	24	3,6	0,118	21,6	244	31,7
240/39*	26	3,4	0,122	21,6	236	38,6
240/56	30	3,2	0,120	22,4	241	56,3
300/39	24	4	0,096	24,0	301	38,6
300/48*	26	3,8	0,098	24,1	295	47,8
300/66	30	3,5	0,100	25,5	288,5	65,8
330/30	48	2,98	0,086	24,8	335	29,1
330/43	54	2,8	0,087	25,2	332	43,1
400/18	42	3,4	0,076	26,0	381	18,8
400/51	54	3,05	0,073	27,5	394	51,1
400/64	26	4,37	0,074	27,7	390	63,5
400/93	30	4,15	0,071	29,1	406	93,2
500/26	42	3,9	0,058	30,0	502	26,6
500/64	54	3,4	0,058	30,6	490	63,5
600/72	84	3,7	0,050	33,2	580	72,2

*Провод марки АСК изготавливается для указанных сечений.

Таблица П.1.5

**Расчетные данные воздушных линий напряжением 380 В, 6, 10 кВ
со сталеалюминиевыми проводами**

Номинальное сечение, мм ² (алюминий/сталь)	Удельное сопротивление при 20 °С r_0 , Ом/км	Удельное индуктивное сопротивление x_0 , Ом/км, при напряжении, кВ		
		0,38	6	10
25/4,2	1,152	0,319	0,392	0,401
35/6,2	0,777	0,308	0,376	0,386
50/8	0,595	0,297	0,368	0,378
70/11	0,422	0,283	0,357	0,367
95/16	0,301	0,274	0,347	0,356
120/19	0,244	–	0,338	0,349

Таблица П.1.6

Расчетные данные ВЛ 35–220 кВ со сталеалюминиевыми проводами

Номинальное сечение, мм ² (алюминий/сталь)	Удельное сопротивление при 20 °С r_0 , Ом/км	220 кВ		110 кВ		35 кВ
		x_0 , Ом/км	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	x_0 , Ом/км	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	x_0 , Ом/км
70/11	0,422	–	–	0,444	2,547	0,432
95/16	0,301	–	–	0,434	2,611	0,421
120/19	0,244	–	–	0,427	2,658	0,414
150/24	0,204	–	–	0,420	2,707	0,406
185/29	0,159	–	–	0,413	2,747	–
240/32	0,118	0,435	2,604	0,405	2,808	–
300/39	0,096	0,429	2,645	–	–	–
400/51	0,073	0,42	2,701	–	–	–
500/64	0,058	0,413	2,740	–	–	–

**Расчетные данные ВЛ 330 кВ и выше
со сталеалюминиевыми проводами**

Номинальное сечение, мм ² (алюминий/ сталь)	Число проводов в фазе, шт.	r_0 , Ом/км при 20 °С	750 кВ		500 кВ		330 кВ	
			x_0 , Ом/км	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	x_0 , Ом/км	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	x_0 , Ом/км	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км
240/32	2	0,0590	–	–	–	–	0,331	3,79
240/56	5	0,0240	0,308	3,76	–	–	–	–
300/39	2	0,0480	–	–	–	–	0,328	3,41
300/66	3	0,330	–	–	0,31	3,97	–	–
	5	0,020	0,288	4,11	–	–	–	–
330/43	3	0,0290	–	–	0,308	3,604	–	–
400/51	2	0,0365	–	–	–	–	0,323	3,46
	3	0,0243	–	–	0,306	3,623	–	–
	5	0,0146	0,286	4,13	–	–	–	–
400/64	4	0,0187	0,289	4,13	–	–	–	–
500/64	2	0,0295	–	–	–	–	0,32	3,497
	3	0,0197	–	–	0,304	3,645	–	–
	4	0,0148	0,303	3,9	–	–	–	–

Допустимый длительный ток для неизолированных проводов

Номинальное сечение, мм ²	Сечение (алюминий/сталь), мм ²	Ток, А, для проводов марок					
		АС, АСКС, АСК, АСКП		М	А и АКП	М	А и АКП
		вне помещений	внутри помещений	вне помещений	внутри помещений	вне помещений	внутри помещений
10	10/1,8	84	53	95	–	60	–
16	16/2,7	111	79	133	105	102	75
25	25/4,2	142	109	183	136	137	106
35	35/6,2	175	135	223	170	173	130
50	50/8	210	165	275	215	219	165
70	70/11	265	210	337	265	268	210
95	95/16	330	260	422	320	341	255
120	120/19	390	313	485	375	395	300
	120/27	375	–				
150	150/19	450	365	570	440	465	355
	150/24	450	365				
	150/34	450	–				
185	185/24	520	430	650	500	540	410
	185/29	510	425				
	185/43	515	–				
240	240/32	605	505	760	590	685	490
	240/39	610	505				
	240/56	610	–				
300	300/39	710	600	880	680	740	570
	300/48	690	585				
	300/66	680	–				
330	330/27	730	–	–	–	–	–
400	400/22	830	713	1050	815	895	690
	400/51	825	705				
	400/64	860	–				
500	500/27	960	830	–	980	–	820
	500/64	945	815				
600	600/72	1050	920	–	1100	–	955
700	700/86	1180	1040	–	–	–	–

Примечания. 1. Длительные токовые нагрузки одинаковы для проводов марок АС, АСКС, АСК и АСКП.

2. Допустимая температура нагрева +70 °С при температуре воздуха +25 °С.

Таблица П.1.9

**Технические характеристики проводов СИП-3 с изоляцией
из сшитого полиэтилена для ВЛП напряжением 10 кВ**

Площадь сечения, мм ²	Диаметр, мм	Длительно допустимый ток, А	Ток термической стойкости при односекундном коротком замыкании, кА	Удельное активное сопротивление r_0 , Ом/км
35	11,5	200	3,2	0,986
50	12,6	245	4,3	0,720
70	14,6	320	6,4	0,493
95	16,0	370	8,6	0,363
120	17,4	430	11,0	0,288
150	18,8	485	13,5	0,263

Примечание. Допустимая температура нагрева +90 °С.

Таблица П.1.10

**Технические характеристики проводов СИП с изоляцией
из сшитого полиэтилена для ВЛИ напряжением 380 В**

Площадь сечения, мм ²	Диаметр, мм	Длительно допустимый ток, А	Ток термической стойкости при односекундном коротком замыкании, кА	Удельное активное сопротивление r_0 , Ом/км	
				фазной жилы	нулевой жилы
СИП-2, СИП-2А					
1×16+1×25	15	105	1,5	1,91	1,38
3×16+1×25	21	100	1,5	1,91	1,38
3×25+1×35	26	130	2,3	1,20	0,986
3×35+1×50	30	160	3,2	0,868	0,72
3×50+1×50	33	195	4,6	0,641	0,72
3×50+1×70	35	195	4,6	0,641	0,493
3×70+1×70	38	240	6,5	0,443	0,493
3×70+1×95	41	240	6,5	0,443	0,363
3×95+1×70	43	300	6,9	0,320	0,493
3×95+1×95	44	300	6,9	0,320	0,363
3×120+1×95	47	340	7,2	0,253	0,363
4×16+1×25	22	100	1,5	1,91	1,38
4×25+1×35	26	130	2,3	1,20	0,986

Окончание табл. П.1.10

Площадь сечения, мм ²	Диаметр, мм	Длительно допустимый ток, А	Ток термической стойкости при односекундном коротком замыкании, кА	Удельное активное сопротивление r_0 , Ом/км	
				фазной жилы	нулевой жилы
СИПс-4					
4×25	23	130	2,3	1,20	1,20
4×35	24	160	3,2	0,868	0,868
4×50	29	195	4,6	0,641	0,641
4×70	32	240	6,5	0,443	0,443
4×95	39	290	7,0	0,320	0,320
4×120	41	340	7,6	0,253	0,253

Примечание. Допустимая температура нагрева +90 °С.

Таблица П.1.11

Технические характеристики СИП с изоляцией из термопластичного полиэтилена для ВЛИ напряжением 380 В

Площадь сечения, мм ²	Диаметр, мм	Длительно допустимый ток, А	Ток термической стойкости при односекундном коротком замыкании, кА	Удельное активное сопротивление r_0 , Ом/км	
				фазной жилы	нулевой жилы
СИП-1, СИП-1А					
3×16+1×25	21	70	1,0	1,91	1,38
3×25+1×35	26	95	1,6	1,20	0,986
3×35+1×50	30	115	2,3	0,868	0,72
3×50+1×50	32	140	3,2	0,641	0,72
3×50+1×70	35	140	3,2	0,641	0,493
3×70+1×70	38	180	4,5	0,443	0,493
3×70+1×95	41	180	4,5	0,443	0,363
3×95+1×70	43	220	5,2	0,320	0,493
3×95+1×95	44	220	5,2	0,320	0,363
3×120+1×95	47	250	5,9	0,253	0,363
4×16+1×25	22	70	1,0	1,91	1,38
4×25+1×35	26	95	1,6	1,20	0,986

Примечание. Допустимая температура нагрева +90 °С.

Таблица П.1.12

**Длительно допустимые токи кабелей с бумажной изоляцией,
прокладываемых в земле при температуре почвы +15 °С**

Сечение жилы, мм ²	Ток, А, для кабелей		
	трехжильных напряжением, кВ		четырёхжильных до 1 кВ
	6	10	
10	80/60	–	85/65
16	105/80	95/75	115/90
25	135/105	120/90	150/115
35	160/125	150/115	175/135
50	200/155	180/140	215/165
70	245/190	215/165	265/200
95	295/225	265/205	310/240
120	340/260	310/240	350/270
150	390/300	355/275	395/305
185	440/340	400/310	450/345
240	510/390	460/355	–

Примечания: 1. В числителе приведены данные для медных жил, в знаменателе – для алюминиевых.
2. Приведенные в таблице токи соответствуют следующим допустимым температурам нагрева жил: для кабелей 6 кВ – 65 °С; 10 кВ – 60 °С.

Таблица П.1.13

**Длительно допустимые токи кабелей с бумажной изоляцией,
прокладываемых в воздухе при температуре почвы +25 °С**

Сечение жилы, мм ²	Ток, А, для кабелей		
	трехжильных напряжением, кВ		четырёхжильных до 1 кВ
	6	10	
10	55/42	–	60/45
16	65/50	60/46	80/60
25	90/70	85/65	100/75
35	110/85	105/80	120/95
50	145/110	135/105	145/110
70	175/135	165/130	185/140
95	215/165	200/155	215/165
120	250/190	240/185	260/200
150	290/225	270/210	300/230

Окончание табл. П.1.13

Сечение жилы, мм ²	Ток, А, для кабелей		
	трехжильных напряжением, кВ		четырёхжильных до 1 кВ
	6	10	
185	325/250	305/235	340/260
240	375/290	350/270	–

Примечание. В числителе приведены данные для медных жил, в знаменателе – для алюминиевых.

Таблица П.1.14









**Длительно допустимые токи для трехжильных кабелей
на напряжение 6 и 10 кВ с медными и алюминиевыми жилами
с пластмассовой изоляцией, прокладываемых в земле и в воздухе**

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А			
	В земле		В воздухе	
	Поливинилхлорид и полиэтилен	Вулканизиро- ванный полиэтилен	Поливинилхлорид и полиэтилен	Вулканизиро- ванный полиэтилен
10	70/55	79/62	65/50	73/57
16	92/70	104/79	85/65	96/73
25	122/90	138/102	110/85	124/96
35	147/110	166/124	135/105	153/119
50	175/130	198/147	165/125	186/141
70	215/160	243/181	210/155	237/175
95	260/195	294/220	255/190	288/215
120	295/220	333/249	300/220	339/249
150	335/250	379/283	335/250	379/283
185	380/285	429/322	385/290	435/328
240	445/335	503/379	460/345	–

Примечания: 1. В числителе приведены данные для кабелей с медными жилами, в знаменателе – с алюминиевыми.
2. Токи для кабелей, проложенных в воде, определяются умножением данных табл. П.1.14 на коэффициент 1,3.

Таблица П.1.15

**Длительно допустимые токи для одножильных кабелей
на напряжение 6 и 10 кВ с медными и алюминиевыми жилами
с изоляцией из сшитого полиэтилена, прокладываемых
в земле и в воздухе, А**

Сечение жилы, мм ²	Медь				Алюминий			
	Воздух		Земля		Воздух		Земля	
								
50	245	290	220	230	185	225	170	175
70	300	360	270	280	235	280	210	215
95	370	435	320	335	285	340	250	260
120	425	500	360	380	330	390	280	295
150	475	560	410	430	370	440	320	330
185	545	635	460	485	425	505	360	375
240	645	745	530	560	505	595	415	440
300	740	845	600	640	580	680	475	495
400	845	940	680	730	675	770	540	570
500	955	1050	750	830	780	865	610	650
630	1115	1160	830	940	910	1045	680	750
800	1270	1340	920	1030	1050	1195	735	820

Примечание. Допустимая температура нагрева +90 °С.

Таблица П.1.16

Поправочные коэффициенты на температуру окружающей среды

Условная температура среды, °С	Нормированная температура провода, °С	Поправочные коэффициенты на температуру окружающей среды, °С											
		-5 и ниже	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
15	80	1,14	1,11	1,08	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73	0,68
25	80	1,24	1,20	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74
25	70	1,29	1,24	1,20	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67
15	65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55
25	65	1,32	1,27	1,22	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,70	0,71	0,61

Окончание табл. П.1.16

Условная температура среды, °С	Нормированная температура проводника, °С	Поправочные коэффициенты на температуру окружающей среды, °С											
		-5 и ниже	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
15	60	1,20	1,15	1,12	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75	0,67	0,57	0,47
25	60	1,35	1,31	1,25	1,20	1,13	1,07	1,00	0,93	0,85	0,76	0,66	0,54
15	55	1,22	1,17	1,12	1,07	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71	0,61	0,50	0,36
25	55	1,41	1,35	1,29	1,23	1,15	1,08	1,00	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41
15	50	1,25	1,20	1,14	1,07	1,00	0,93	0,84	0,76	0,66	0,54	0,37	–
25	50	1,48	1,41	1,34	1,26	1,18	1,09	1,00	0,89	0,78	0,63	0,45	–

Таблица П.1.17

Поправочные коэффициенты на количество работающих кабелей, лежащих рядом в земле

Расстояние между осями кабелей, мм	Значение коэффициента снижения длительно допустимого тока при количестве кабелей					
	1	2	3	4	5	6
100	1,0	0,84	0,72	0,68	0,64	0,61
200	1,0	0,88	0,79	0,74	0,70	0,68
300	1,0	0,90	0,82	0,77	0,74	0,72

Таблица П.1.18


Допустимая на период ликвидации послеаварийного режима перегрузка для кабелей напряжением до 10 кВ с бумажной изоляцией

Вид прокладки	Допустимая перегрузка по отношению к номинальной при длительности максимума, ч		
	1	3	6
В земле	1,5/1,35	1,35/1,25	1,25/1,20
В воздухе	1,35/1,30	1,25/1,25	1,25/1,25
В трубах (в земле)	1,30/1,20	1,20/1,15	1,15/1,10

Примечание. В числителе приведены данные при коэффициенте предварительной нагрузки 0,6, в знаменателе – 0,8.

Таблица П.1.19

**Расчетные данные кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена
напряжением 10 кВ**

Сечение жилы, мм ²	Активное сопротивление, Ом/км		Индуктивное сопротивление, Ом/км, при расположении кабелей		Ток короткого замыкания, кА, кабелей	
	медной жилы	алюминиевой жилы			с медной жилой	с алюминиевой жилой
50	0,387	0,641	0,126	0,184	7,15	4,7
70	0,268	0,443	0,119	0,177	10,0	6,6
95	0,193	0,320	0,112	0,170	13,6	8,9
120	0,153	0,253	0,108	0,166	17,2	11,3
150	0,124	0,206	0,106	0,164	21,5	14,2
185	0,099	0,164	0,103	0,161	25,5	17,5
240	0,075	0,125	0,099	0,157	34,3	22,7
300	0,060	0,100	0,096	0,154	42,9	28,2
400	0,047	0,078	0,093	0,151	57,2	37,6
500	0,031	0,061	0,090	0,148	71,5	47,0
630	0,028	0,046	0,087	0,145	90,1	59,2
800	0,022	0,037	0,083	0,142	114,4	75,2

Примечания: 1. Приведенные значения r_0 соответствуют температуре +20 °С.
2. Значения x_0 указаны с учетом заземления медного экрана с двух сторон.

Таблица П.1.20

**Минимальный диаметр проводов по условиям короны
и радиопомех, мм**

Напряжение ВЛ, кВ	Фаза с проводом	
	одиночным	два и более
110	11,4 (АС70/11)	–
220	21,6 (АС240/32)	–
	24,0 (АС300/39)	–
330	33,2 (АС600/72)	2×21,6 (2×АС240/32)
		3×15,2 (3×АС120/19)
		3×17,1 (3×АС150/24)
500	–	2×36,2 (2×АС700/86)
		3×24,0 (3×АС300/39)
		4×18,8 (4×АС185/29)
750	–	4×29,1 (4×АС400/93)
		5×21,6 (5×АС240/32)

- Примечания:* 1. Для ВЛ 220 кВ минимальный диаметр провода 21,6 мм относится к горизонтальному расположению фаз, а в остальных случаях допустим с проверкой по радиопомехам.
2. Для ВЛ 330 кВ минимальный диаметр провода 15,2 мм (три провода фазе) относится к одноцепным опорам.

Содержание

Предисловие.....	3
<i>Тема 1.</i> Выбор номинального напряжения сети и трансформаторов ...	4
<i>Тема 2.</i> Выбор проводников линий электропередачи	10
<i>Тема 3.</i> Выбор и оценка возможностей средств регулирования напряжения	24
Варианты экзаменационных задач.....	29
Литература	31
Приложение	32

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Лычев Петр Васильевич
Медведев Константин Михайлович

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Практикум
по одноименному курсу для студентов
специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические
системы и сети» дневной формы обучения

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. В. Гладкова*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 27.07.12.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,61.

Изд. № 67.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр Учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48