

## Лабораторная работа № 2 «Расчёт режима максимальных нагрузок радиальной электрической сети»

Цель работы: расчёт режима максимальных нагрузок радиальной электрической сети по аналитическим выражениям и с помощью программного комплекса.

**Вариант исходных данных из табл. 3.1–3.5 определяется по первым *тремя* буквам фамилии и инициалам студента.** Например, студент Иванов Сергей Петрович будет иметь шифр задания ИВАСП. Это означает, что из табл. 3.1 исходных данных к лабораторной работе следует взять вариант – И, из табл. 3.2 – В, из табл. 3.3 – А, из табл. 3.4 – С, из табл. 3.5 – П.

Если фамилия состоит из одной или двух букв, то в качестве второй и третьей буквы следует взять букву А. Если нет второго инициала, то в качестве пятой буквы следует взять букву А.

Лабораторная работа выполняется с использованием программного комплекса RastrWin3 (сайт разработчика: <http://www.rastrwin.ru/> [14] ) или другого программного комплекса, предназначенного для расчёта режимов электрических сетей и доступного студенту.

**Лабораторные работы, выполненные не по своему варианту, на проверку не принимаются.**

В конце отчёта по лабораторным работам необходимо указать, какие учебники, учебные пособия и электронные ресурсы были использованы при их выполнении.

Если отчёт не зачтён, то он возвращается студенту для доработки. При этом студент должен внести исправления и ответить на замечания, сделанные преподавателем.

В работе предлагается выполнить расчёт режима максимальных нагрузок радиальной электрической сети, принципиальная схема которой приведена на рис. 3.1.

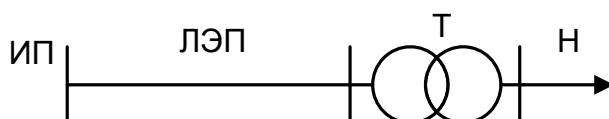


Рис. 3.1. Схема электрической сети

Исходные данные для расчёта.

Номинальное напряжение электрической сети  $U_{\text{ном}} = 35$  кВ;  
номинальное напряжение электроприёмника  $U = 10$  кВ.

По степени надёжности электроснабжения электроприёмники отнесены ко второй категории.

Параметры источника питания, электроприёмника (нагрузки) и линии электропередачи приведены в табл. 3.1–3.5.

Таблица 3.1

Напряжение источника питания  
в режиме максимальных нагрузок, кВ

	АБД	ГВЗ	ЕЖЩ	ИЙКЁ	ЛМЫ	НОП	РСТ	УФХЪ	ЦЧШ	ЭЮЯЬ
$U_0$	37,3	37,5	38,0	38,5	37,5	38,4	38,5	37,5	38,0	38,6

Таблица 3.2

Активная мощность электроприёмника  
в режиме максимальных нагрузок, МВт

	АБД	ГВЗ	ЕЖЩ	ИЙКЁ	ЛМЫ	НОП	РСТ	УФХЪ	ЦЧШ	ЭЮЯЬ
$P_{\text{max}}$	5	6	7	8	8	8	9	11	12	13

Таблица 3.3

Коэффициент мощности электроприёмника

	АБД	ГВЗ	ЕЖЩ	ИЙКЁ	ЛМЫ	НОП	РСТ	УФХЪ	ЦЧШ	ЭЮЯЬ
$\cos \varphi$	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89

Таблица 3.4

Число часов использования наибольшей нагрузки, час

	АБД	ГВЗ	ЕЖЩ	ИЙКЁ	ЛМЫ	НОП	РСТ	УФХЪ	ЦЧШ	ЭЮЯЬ
$T_{\text{max}}$	2600	3200	3600	4200	4700	5000	5300	5700	6000	6500

Таблица 3.5

Длина линии электропередачи (ЛЭП), км

	АБД	ГВЗ	ЕЖЩ	ИЙКЁ	ЛМЫ	НОП	РСТ	УФХЪ	ЦЧШ	ЭЮЯЬ
$L$	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30

## Методические указания к лабораторной работе № 2

Пользуясь исходными данными, выполните расчёт режима максимальных нагрузок заданной на рис. 3.1 электрической сети в соответствии с приведённым ниже алгоритмом:

1. Выбор параметров элементов электрической сети.
  - 1.1. Выбор и проверка сечения проводов линии электропередачи.
  - 1.2. Выбор трансформаторов на подстанции.
2. Расчёт электрического режима.
  - 2.1. Составление схемы замещения электрической сети и определение её параметров.
  - 2.2. Расчёт потоков мощности на участках схемы замещения с учётом потерь мощности в элементах.
  - 2.3. Расчёт напряжений в узлах схемы.
3. Выводы по работе.

### Предварительный расчёт мощности нагрузки

По известным значениям  $P_{\max}$  и  $\cos \varphi$  определяем модуль полной мощности:

$$S_{\max} = \frac{P_{\max}}{\cos \varphi} .$$

и реактивную мощность:

$$Q_{\max} = \sqrt{S_{\max}^2 - P_{\max}^2} .$$

Комплексное значение полной мощности нагрузки в максимальном режиме определяется выражением:

$$\underline{S}_{\max} = P_{\max} + jQ_{\max} .$$

### Выбор числа цепей и сечения проводов линий

Число цепей ЛЭП  $n_{\text{ц}}$  выбирается в зависимости от величины нагрузки и категории потребителей по надёжности электроснабжения. Для потребителей первой и второй категории выбираются две цепи ЛЭП.

При выборе сечений проводов используется метод экономической плотности тока [7]. Значения экономической плотности тока  $j_{\text{ЭК}}$  приведены в табл. 3.6 [4].

Таблица 3.6

Значения экономической плотности тока

	Экономическая плотность тока, А/мм <sup>2</sup> , при числе часов
--	---

Проводники	использования максимума нагрузки в год		
	более 1000 до 3000	более 3000 до 5000	более 5000
Неизолированные алюминиевые провода	1,3	1,1	1,0

Выбор сечений проводов воздушных линий (ВЛ) по *экономической плотности тока* выполняется следующим образом.

Ток на пятый год эксплуатации линии в нормальном режиме:

$$I_{(5)} = \frac{S_{\max}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot n_{\text{ц}}}.$$

Определяется расчётный ток в нормальном режиме работы:

$$I_{\text{р}} = I_{(5)} \cdot \alpha_i \cdot \alpha_T,$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент, учитывающий изменение нагрузки по годам эксплуатации линии, колеблется в диапазоне 0,6 до 1,65, примем равным 1;  $\alpha_T$  – коэффициент, учитывающий число часов использования максимальной нагрузки линии  $T_{\max}$ , принимается в зависимости от номинального напряжения и коэффициента участия в максимуме энергосистемы [7].

По табл. 3.6 [4] определяется экономическая плотность тока  $j_{\text{эк}}$ .

Экономическое сечение проводов фазы проектируемой линии:

$$F_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{р}}}{j_{\text{эк}}}.$$

Полученное сечение  $F_{\text{эк}}$  округляется до ближайшего стандартного сечения в [7].

Сечения проводов, выбранных по экономическому критерию, проверяются на соответствие ряду технических требований [1]. Окончательный выбор сечения можно сделать только после проверки выполнения этих требований.

*Проверка по механической прочности.* Сечение провода, выбранное по экономическому критерию, должно соответствовать условию:

$$F \geq F_{\text{min мех}}.$$

Минимально допустимые сечения проводов по условиям механической прочности  $F_{\text{min мех}}$  приведены в табл. 3.7 [4].

Таблица 3.7

Минимально допустимые сечения проводов  
по условиям механической прочности

Характеристика ВЛ	Сечение сталеалюминиевых проводов, мм <sup>2</sup>
ВЛ без пересечений в районах по гололёду:	
до II	35/6,2
в III–IV	50/8
в V и более	70/11
ВЛ, сооружаемые на двухцепных или многоцепных опорах:	
до 20 кВ	70/11
35 кВ и выше	120/19

*Проверка по условиям короны.* Проверка сечений проводов по условиям короны выполняется для ВЛ 110 кВ и выше. Выбранное сечение должно соответствовать условию:

$$F \geq F_{\min \text{ кор.}}$$

Минимально допустимые диаметры проводов ВЛ по условиям короны  $F_{\min \text{ кор}}$  приведены в табл. 3.8 [4].

*Проверка по допустимой токовой нагрузке (по нагреву).* Сечение провода, выбранное по экономическому критерию, должно быть проверено по условию:

$$I_{\text{нб}} < I_{\text{доп}},$$

где  $I_{\text{доп}}$  – допустимый длительный ток для проводника, определяемый по справочнику [7] для выбранного сечения;  $I_{\text{нб}}$  – наибольшее значение тока в длительных режимах, под которыми обычно подразумеваются послеаварийные и ремонтные режимы электрической сети.

Таблица 3.8

Минимально допустимые диаметры проводов ВЛ  
по условиям короны

Напряжение ВЛ, кВ	Фаза с одиночными проводами
110	11,4 (АС 70/11)
150	15,2 (АС 120/19)
220	21,6 (АС 240/32) 24,0 (АС 300/39)

В двухцепной линии наибольший ток будет протекать при отключении одной из цепей:

$$I_{\text{нб}} = \frac{S_{\text{max}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} (n_{\text{ц}} - 1)}.$$

*Проверка по допустимой потере напряжения.* Проверке по потерям напряжения воздушные линии 35 кВ и выше не подлежат, так как повышение уровня напряжения путём увеличения сечения проводов по сравнению с применением на понижающих подстанциях трансформаторов с РПН экономически не оправдано [1].

### Выбор количества и мощности трансформаторов на понижающей подстанции

Для потребителей первой и второй категорий предусматривается установка не менее двух трансформаторов на подстанциях.

В современной практике проектирования при определении расчётной мощности трансформаторов на понижающих подстанциях с установкой двух трансформаторов ( $n_{\text{T}} = 2$ ) применяется эмпирическая формула:

$$S_{\text{T расч}} = 0,7 P_{\text{max}}.$$

По расчётной мощности трансформатора из справочника [7] выбирается ближайший больший по номинальной мощности понижающий трансформатор.

### Составление схемы замещения электропередачи и определение её параметров

Для расчётов режимов электрических сетей 35 кВ и ниже можно использовать упрощённую схему замещения ЛЭП, не содержащую поперечных элементов (зарядных мощностей). Тогда схема замещения электрической сети (рис. 3.1) будет иметь вид схемы на рис. 3.2.

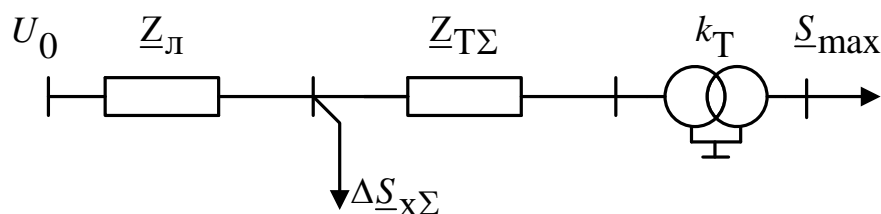


Рис. 3.2. Схема замещения электрической сети

Определяются параметры схемы замещения.

Сопротивление линии:

$$\underline{Z}_Л = \frac{L(r_0 + jx_0)}{n_ц},$$

где  $r_0$  и  $x_0$  – погонные соответственно активное и реактивное сопротивления проводов ЛЭП, Ом/км [7].

Суммарное сопротивление трансформаторов на подстанции:

$$\underline{Z}_{Т\Sigma} = r_{Т\Sigma} + jx_{Т\Sigma} = \frac{r_T + jx_T}{n_T},$$

где  $r_T$  и  $x_T$  – активное и реактивное сопротивления обмоток трансформатора.

Суммарные потери холостого хода трансформаторов:

$$\Delta S_{X\Sigma} = n_T(\Delta P_X + j\Delta Q_X).$$

где  $\Delta P_X$  и  $\Delta Q_X$  – активные и реактивные потери холостого хода трансформатора.

### Расчёт электрического режима

Целью расчёта установившегося режима электросети является определение следующих параметров: потоков мощностей по всем ветвям; напряжений во всех узлах.

Приступая к расчёту режима, следует на схеме замещения обозначить все потоки мощности по участкам сети и напряжения в узлах сети (рис. 3.3).

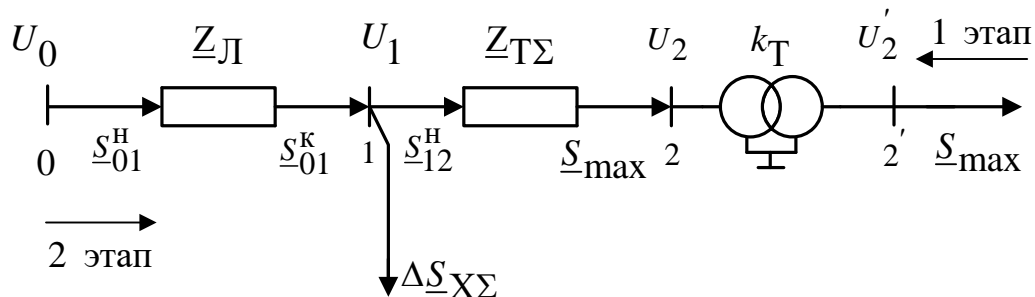


Рис. 3.3. Расчётная схема замещения электрической сети

Так как здесь напряжение и нагрузка заданы в различных точках электрической сети, то расчёт установившегося режима осуществляется приближенным (итерационным) методом. В учебных расчётах

достаточно ограничиться одной итерацией, состоящей из двух этапов, рассматриваемых ниже.

*Первый этап – расчёт потоков мощности на всех участках схемы замещения с учётом потерь мощности.* Полагаем, что напряжения во всех точках одинаковы и равны номинальному напряжению сети  $U_{\text{ном}}$ . Расчёт потоков мощности по элементам сети осуществляется от конца схемы (где подключена нагрузка) к её началу (где подключён источник питания).

Потери мощности в суммарном сопротивлении трансформаторов:

$$\Delta \underline{S}_{\text{T}} = \left( \frac{S_{\text{max}}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \cdot \underline{Z}_{\text{T}\Sigma}.$$

Поток мощности в начале трансформаторной ветви:

$$\underline{S}_{12}^{\text{H}} = \underline{S}_{\text{max}} + \Delta \underline{S}_{\text{T}}.$$

Поток мощности в конце линии:

$$\underline{S}_{01}^{\text{K}} = \underline{S}_{12}^{\text{H}} + \Delta \underline{S}_{\text{X}\Sigma}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии:

$$\Delta \underline{S}_{\text{Л}} = \left( \frac{S_{01}^{\text{K}}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \cdot \underline{Z}_{\text{Л}}.$$

Поток мощности в начале линии:

$$\underline{S}_{01}^{\text{H}} = \underline{S}_{01}^{\text{K}} + \Delta \underline{S}_{\text{Л}}.$$

*Второй этап – расчёт напряжений в узлах и падения (потери) напряжения на элементах схемы замещения.* Используя потоки мощности, определённые на первом этапе, рассчитываются падения напряжения на каждом элементе и определяются напряжения во всех узлах сети. Расчёт напряжений осуществляется от известного напряжения источника питания  $U_0$ . Падения напряжения на каждом элементе рассчитываются без учёта поперечной составляющей, которую необходимо учитывать при расчёте режимов электрических сетей 220 кВ и выше [1].

Падение (равное потере) напряжения на сопротивлении линии:

$$\Delta U_{01} = \frac{P_{01}^{\text{H}} \cdot r_{\text{Л}} + Q_{01}^{\text{H}} \cdot x_{\text{Л}}}{U_0}.$$



Напряжение в узле 1:

$$U_1 = U_0 - \Delta U_{01}.$$

Падение (равное потере) напряжения на суммарном сопротивлении трансформаторов:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12}^H \cdot r_{T\Sigma} + Q_{12}^H \cdot x_{T\Sigma}}{U_1}.$$

Напряжение в узле 2:

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{12}.$$

*Определение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.*

Номинальный коэффициент трансформации:

$$U_2' = \frac{U_2}{k_T} = \frac{U_2}{\frac{U_{B.ном}}{U_{H.ном}}} = \frac{U_2 \cdot U_{H.ном}}{U_{B.ном}},$$

где  $U_{H.ном}$  и  $U_{B.ном}$  – номинальные напряжения соответственно обмоток низшего и высшего напряжений трансформатора [6].

### **Расчёт режима максимальных нагрузок с помощью программного комплекса**

Рассчитать режим максимальных нагрузок можно с использованием программного комплекса RastrWin3 (инструкцию можно найти на сайте разработчика <http://www.rastrwin.ru/> [14]) или с помощью любого другого программного комплекса, предназначенного для расчёта режимов электрических сетей и доступного студенту.

К отчёту по лабораторной работе следует приложить файл расчёта режима.

В конце отчёта (заключении) необходимо проанализировать все расчёты и ответить на вопрос: обеспечивает ли спроектированная электрическая сеть электропотребителя электроэнергией с необходимыми ему параметрами. Выводы должны быть подтверждены полученными результатами расчётов.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Методическое обеспечение

#### Основная литература:

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.proektant.org/books/0008-ELE-1989.pdf>, свободный.

2. Электрические системы. Электрические сети / под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://publ.lib.ru/ARCHIVES/V/VENIKOV\\_Valentin\\_Andreevich/\\_Venikov\\_V.A..html#0002](http://publ.lib.ru/ARCHIVES/V/VENIKOV_Valentin_Andreevich/_Venikov_V.A..html#0002), свободный.

3. Лыкин П.В. Электрические системы и сети: учеб. пособие. – М.: Университетская книга; Логос, 2008. – 254 с.

4. Правила устройства электроустановок. – М.: КноРус, 2014 (Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2014 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=98464&fld=134&dst=1000000001,0&rnd=0.8454094384244503#09861620465484267>, свободный.

5. Электроэнергетические системы и сети: метод. указ. к курсовому проектированию для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профили «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических сетей», «Электроснабжение» / сост. Н.Л. Бацева, Н.П. Фикс; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 26 с.

#### Дополнительная литература:

6. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети: учебник / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, П.В. Лычев. – Минск: Технопринт, 2004.

7. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://portal.tpu.ru/SHARED/a/ANDREEVMV/academic/avtomatika\\_ees/Tab1/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%B1%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf](http://portal.tpu.ru/SHARED/a/ANDREEVMV/academic/avtomatika_ees/Tab1/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%B1%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf), свободный.

8. Межгосударственный стандарт ГОСТ 21027-75 «Системы энергетические. Термины и определения». – М.: Стандартиформ, 2005. – 6 с.

### **Информационное обеспечение:**

9. СТО ТПУ 2.5.01-2006. Система образовательных стандартов. Работы выпускные, квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления / ТПУ [Электронный ресурс]. – Томск, 2006. – Режим доступа: <http://109.123.155.36/f/1959/m1.pdf>, свободный.

10. НЭЛБУК, Электронная библиотека (ЭБ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.nelbook.ru/?search=электрические сети](http://www.nelbook.ru/?search=электрические%20сети), свободный.

11. Сайт ОАО «Системный оператор Единой энергосистемы России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://so-ops.ru/index.php?id=rza\\_goals\\_rel](http://so-ops.ru/index.php?id=rza_goals_rel), свободный.

12. Сайт федеральной сетевой компании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.fsk-ees.ru](http://www.fsk-ees.ru), свободный.

13. Сайт режимщиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.Regimov.net](http://www.Regimov.net), свободный.

14. Сайт создателей программного обеспечения для расчёта режимов энергосистем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.RastrWin.ru](http://www.RastrWin.ru), свободный.