



Некоммерческое  
акционерное  
общество

**АЛМАТИНСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ЭНЕРГЕТИКИ И  
СВЯЗИ**

Кафедра электрических  
станций и  
электроэнергетических  
систем

## **ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Методические указания и задания по выполнению  
расчетно-графических работ  
для магистрантов профильной  
специальности 6М071800 – Электроэнергетика

Алматы 2018

СОСТАВИТЕЛИ: Ж.А. Жанова. Волновые процессы в электрических сетях. Методические указания и задания по выполнению расчетно-графических работ для магистрантов профильной специальности 6М071800 – Электроэнергетика. – Алматы: АУЭС, 2018. – 15 с.

Методические указания предназначены для выполнения расчетно-графических работ по дисциплине «Волновые процессы в электрических сетях», содержат: задания, методические указания к выполнению РГР, контрольные вопросы, а также список необходимой литературы.

Методические указания предназначены для студентов профильной магистратуры специальности 6М071800 – Электроэнергетика.

Ил.3, табл.6, библиогр. –7 назв.

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2018г.

## 1 Общие положения

Предметом изучения курса «Волновые процессы в электрических сетях» являются вопросы возникновения внутренних и внешних (грозовых) перенапряжений, воздействующих на линии электропередачи и оборудование подстанций; распространения волн в проводах с учетом потерь, преломления и отражения волн; повышение напряжения резонансного характера.

Изучаются поведение сетей при различных видах заземления нейтрали, процессы перенапряжений при отключении емкостных и малых индуктивных токов.

По окончании курса «Волновые процессы в электрических сетях» магистрант должен:

*иметь представление:*

- об основных видах воздействия перенапряжений на изоляцию воздушных линий и распределительных устройств;
- о принципах работы, технических характеристик, конструктивных особенностей защитных аппаратов и устройств от перенапряжений;
- о волновых процессах в линиях, в схемах с длинными линиями, в обмотках трансформаторов и машин.
- о назначении, методах и порядке расчета преломленных волн в узлах с нелинейными сопротивлениями;
- о современном состоянии, проблемах и перспективах развития электрических установок высокого напряжения связанных с работой изоляции.

*знать:*

- основные требования, предъявляемые к средствам защиты от перенапряжений;
- методы исследования, правила и условия выполнения работ защиты изоляции электрооборудования;
- основные требования, по использованию специализированного программного обеспечения в области перенапряжения и защиты от перенапряжений;
- методики по разработке теоретических и экспериментальных исследований, обработке, анализу и обобщению результатов исследования волновых процессов;
- компьютерные программы для моделирования перенапряжения и защиты от перенапряжений.

*уметь:*

- рассчитывать и анализировать режимы работы электрических систем при волновых процессах и выработать пути их улучшения;
- анализировать перспективы и направления развития электрических систем при волновых процессах;

- проводить научные исследования, связанные с созданием наиболее экономичных схем, конструкции и типов оборудования для подстанций и линий электропередачи высокого напряжения;

- проводить экспериментальные исследования и анализировать их результаты с целью обобщения, обоснования и выработки рекомендаций по их применению, используя теорию планирования эксперимента и методы автоматизации научных исследований.

Цель расчетно-графических работ – привить навыки самостоятельной работы, выявить знания студентов по данной дисциплине и умение применять эти знания в дальнейшей профессиональной деятельности. В процессе выполнения РГР студент должен самостоятельно работать с учебной и научно-технической литературой, уметь обобщать полученные знания, делать обоснованные выводы.

Методическая разработка включает три расчетно-графические работы, в каждую из которых включены по одной задаче и контрольные вопросы.

Исходные данные для выполнения РГР строго индивидуальны. Каждый студент определяет свой вариант задания в зависимости от учебного года изучения данной дисциплины по трем признакам – по последней и предпоследней цифрам шифра и первой букве своей фамилии.

Согласно таблице 1, по последней цифре шифра (номера зачетной книжки) с учетом года изучения дисциплины устанавливается номер варианта исходных данных первой группы.

Аналогично, согласно таблице 2, устанавливается по предпоследней цифре номера зачетной книжки номер варианта исходных данных второй группы и согласно первой буквы фамилии по таблице 3 – номер варианта исходных данных третьей группы.

Вариант контрольных вопросов в каждой РГР принимается по последней цифре шифра независимо от года обучения.

Т а б л и ц а 1 – Исходные данные первой группы

Учебный год	Последняя цифра зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2018/2019	X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	I
2019/2020	II	I	IV	III	VI	VII	VIII	V	X	IX
2020/2021	V	IV	III	II	I	X	IX	VIII	VII	VI
2021/2022	I	II	V	IV	III	VI	X	VII	IX	VIII
2022/2023	IX	VIII	IX	VI	VII	I	II	IV	III	V

Т а б л и ц а 2 – Исходные данные второй группы

Учебный год	Предпоследняя цифра зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2018/2019	X	VIII	IX	VI	VII	I	II	IV	III	V
2019/2020	II	I	IV	III	VI	VII	VIII	V	X	IX
2020/2021	I	II	V	IV	III	VI	X	VII	IX	VIII
2021/2022	X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	I
2022/2023	V	IV	III	II	I	X	IX	VIII	VII	VI

Т а б л и ц а 3 – Исходные данные третьей группы

Учебный год	Первая буква фамилии									
	А, Л, Х	Б,М, Ц	В,Н,Ч	Г,О,Ш	Д, П,Щ	Е,Р,Э	Ж,С,Ю	З,Т,Я	И,У	К, Ф,
2018/2019	IX	VIII	X	VI	VII	I	II	IV	III	V
2019/2020	II	I	IV	III	VI	VII	VIII	V	X	IX
2020/2021	I	II	V	IV	III	VI	X	VII	IX	VIII
2021/2022	X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	I
2022/2023	V	IV	III	II	I	X	IX	VIII	VII	VI

## 2 Расчетно-графическая работа №1. Атмосферные перенапряжения и защитное действие молниеотводов

### 2.1 Условие задачи

Рассчитать радиус зон защиты одиночного стержневого молниеотвода на высоте защищаемого объекта  $h_x$ .

Оценить минимальные допустимые расстояния между молниеотводом и объектом в воздухе  $l_a$ , а также расстояние в земле  $l_z$  между заземлителями. Допустимые напряженности в воздухе  $E_a = 500 \text{ кВ/м}$  в земле –  $E_z = 300 \text{ кВ/м}$ . Исходные данные в таблице 4. Построить зону защиты, в которой может находиться объект. Оценить вероятность появления молнии с указанными параметрами.

### 2.2 Методические указания к решению задачи

При решении задач грозозащиты необходимо знать параметры разряда молнии, главными из которых являются амплитуда тока молнии  $I_m$ , [кА] и крутизна тока молнии, т.е. скорость нарастания тока  $a = \frac{di_m}{dt}$  [кА/мкс].

Статистические распределения токов молнии  $I_m$  и крутизна аппроксимируются экспоненциальными функциями:

$$P_I = e^{-\frac{I_{\max}}{26}} = e^{-0,04 \cdot I_{\max}}; \quad (2.1)$$

$$P_a = e^{-\frac{a}{15,7}} = e^{-0,08 \cdot a}, \quad (2.2)$$

Т а б л и ц а 4 – Варианты заданий для выполнения РГР

№ вар	Исходные данные 1 группы		Исходные данные 2 группы		Исходные данные 3 группы
	Высота молниеотвода $h$ , м	Высота объекта $h_x$ , м	Ток молнии $I$ мА, кА	Крутизна тока молнии $\alpha$ , кА/мкс	Импульсное сопротивление заземления $R_H$ , Ом
I	40	20	100	30	10
II	25	15	60	20	15
III	20	10	25	25	20
IV	30	16	80	15	25
V	35	17	25	35	30
VI	40	19	60	30	10
VII	25	10	90	25	15
VIII	20	12	40	10	20
IX	30	17	70	20	25
X	35	18	50	15	30

где  $P(I_m)$  и  $P(a)$  – вероятности того, что соответствующая амплитуда  $I_m$  и крутизна превысят заданное значение.

Имеющихся в настоящее время данных недостаточно для установления надежной корреляционной связи между этими величинами, поэтому в расчетах полагают, что  $I_m$  и  $a$  статистические, независимые случайные величины. В этом случае вероятность появления молнии с заданными параметрами:

$$P(I_m, a) = P(I_m) + P(a). \quad (2.3)$$

Молниеотвод предназначен для защиты объектов от прямых ударов молнии, он возвышается над защищаемым объектом и принимает на себя удары молнии. Молниеотводы обладают зоной защиты, вероятность попадания разряда молнии в которую мала.

Зоной защиты называется та часть пространства около молниеотвода, в которой число попаданий молнии в защищаемый объект снижается не менее, чем в 20 или 200 раз, т.е. вероятность прорыва молнии в защищаемый объект

не превосходит 0,05 или 0,005 относительно вероятности попадания молнии в случае отсутствия молниеотвода.

Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода (рисунок 1) представляет собой конус с вершиной, расположенной на высоте  $h_0 < h$ , где  $h$  – высота молниеотвода. Для вероятности попадания молнии в объект  $P_{пр} = 0,05$ ,  $h_0 = 0,92 h$ , а граница зоны защиты описывается уравнением:

$$r_x = 1,5 \left( h - \frac{h_x}{0,92} \right). \quad (2.4)$$

Для вероятности попадания молнии  $P_{пр} = 0,005$ , высота  $h_0 = 0,85 h$ , а граница зоны защиты:

$$r_x = (1,1 - 0,002h) \cdot \left( h - \frac{h_x}{0,85} \right). \quad (2.5)$$

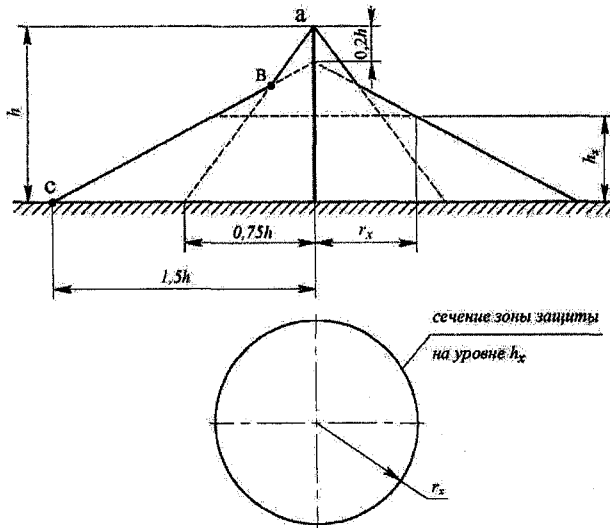


Рисунок 1 - Построение зоны защиты стержневого молниеотвода

При вероятности прорыва молнии  $P_{пр} = 0,05$ , защищаемый объект поражается молнией в среднем один раз за 20 лет эксплуатации.

При ударе молнии в молниеотвод по нему и его заземлителю протекает ток молнии, который создает на индуктивности токоотвода и на заземлителе молниеотвода падение напряжения. При косоугольной форме фронта, импульсе тока молнии  $I_m$  и крутизне фронта  $a$  потенциал в точке молниеотвода, расположенной на расстоянии  $h_x$  от поверхности земли, равен:

$$U_n = I_n R_n + a \cdot h_x L_0, \quad (2.6)$$

где  $R_n$  – импульсное сопротивление заземления молниеотвода, Ом;  
 $L_0$  – индуктивность единицы длины токоотвода, Гн/м.

Защищаемый объект высотой  $h_x$  в зоне защиты должен быть расположен так, чтобы в него не попадал разряд молнии (должен быть вписан в зону защиты), и на него не должны происходить разряды с молниеотвода по воздуху и в земле между заземлителями. Допустимое расстояние вычисляется из выражения:

$$L_{дон} = \frac{U_n}{E_{дон}}. \quad (2.7)$$

## 2.3 Контрольные вопросы

2.3.1 Каковы параметры грозового разряда и их примерные величины?

2.3.2 Каковы защитные характеристики стержневого молниеотвода?

2.3.3 Поясните, по какой причине молниеотвод должен быть удален от защищаемого объекта?

2.3.4 Что называется «защитным углом» тросового молниеотвода и какова его рекомендуемая величина?

2.3.5 Изложите последовательность расчета наименьшей ширины зоны защиты для двух стержневых молниеотводов.

2.3.6 Изложите последовательность расчета радиуса защиты стержневого молниеотвода при его высоте 30м.

2.3.7 Изложите последовательность графического построения защитной зоны для трех и четырех стержневых молниеотводов.

2.3.8 При выполнении каких условий следует считать, что линия в пролете защищена от прямых поражений при использовании двух стержневых молниеотводов.

2.3.9 Почему ток молнии, поражающий провод или трос в середине пролета, следует уменьшать вдвое по сравнению со статистическим, предусматривающим поражение хорошо заземленных объектов?

2.9.10 Каковы параметры грозового разряда и их примерные величины?

### 3 Расчетно-графическая работа №2. Распространение электромагнитных волн и волновое сопротивление элементов электроустановки

#### 3.1 Условие задачи

На подстанцию с установленным на шину ОПН, по ВЛ набегает волна с косоугольным фронтом, крутизной  $a = \frac{U_0}{\tau_{op}}$  (рисунок 2). Определить максимальное напряжение на изоляции, его превышение над пробивным напряжением ОПН  $U_{пр}$ . Оценить допустимую крутизну проходящей волны и рассчитать длину защищенного подхода. Исходные данные в таблице 5.

Т а б л и ц а 5 – Варианты заданий для выполнения РГР

№ вар	Исходные данные 1 группы		Исходные данные 2 группы		Исходные данные 3 группы		
	Номин- альное напря- жение ВЛ, кВ	$U_{пр}$ кВ ОПН при 0,5-20 мкс, кВ	Крутизна прихо- дящей волны $a$ , кВ/мкс	Расстояние между ОПН и объектом, $l_{12}$ , м	Испыт., напря- жение полной волной $U_{исп}$ , кВ	Прочность линейной изоляции, кВ	
						2 мкс	10 мкс
I	110	265	75	10	480	910	650
II	110	265	90	15	480	910	650
III	110	265	100	20	480	910	650
IV	110	265	80	25	480	910	650
V	110	265	70	30	480	910	650
VI	220	515	120	10	750	1700	1200
VII	220	515	160	15	750	1700	1200
VIII	220	515	180	20	750	1700	1200
IX	220	515	220	25	750	1700	1200
X	220	515	220	30	750	1700	1200

$U_{(10)}, U_{(2)}$  – импульсные разрядные напряжения изоляции при временах 2 и 10 мкс, соответственно.

### 3.3 Контрольные вопросы

3.3.1 Что называется волновым сопротивлением элементов с распределенными параметрами?

3.3.2 Почему волновое сопротивление линии электропередачи не зависит от ее протяженности?

3.3.3 Что понимают под термином «крутизна фронта волны»?

3.3.4 В каких пределах изменяются величины коэффициентов преломления и отражения?

3.3.5 При каких соотношениях между длиной волны и протяженностью линии, имеющей волновое сопротивление, нельзя пренебрегать явлениями многократных отражений и преломлений волн?

3.3.6 Сформулируйте правило преобразования схемы с распределенными параметрами в схему с сосредоточенными, по Петерсену.

3.3.7 Когда при рассмотрении волновых процессов индуктивность и емкость можно считать взаимозаменяемыми элементами?

3.3.8 Почему при включении генератора непосредственно в воздушную линию кабельная вставка может считаться средством защиты от коротких волн, набегающих с линии при перенапряжениях?

3.3.9 Подтвердите расчетом различие коэффициентов преломления и отражения для напряжения и тока падающей волны?

3.3.10 От каких параметров изолирующей среды зависит скорость распространения электромагнитной волны?

## 4 Расчетно-графическая работа №3. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью

### 4.1 Условие задачи

Рассчитать емкостной ток замыкания на землю для сети с заданным  $U_{ном}$ . Сравнить расчетный ток и критический для данного класса с учетом характера сетей (тип опоры и т.д.) и при необходимости выбрать тип и номер отпайки ДГР (для реакторов типа РЗДСОМ). Исходные данные в таблице 6.

### 4.2 Методические указания к решению задачи

Решение данной задачи необходимо начать с изучения разделов ПТЭ и ПУЭ, в которых нормированы предельно допустимые токи замыкания на землю и требования к ДГР и его настройке. Величина емкостного тока замыкания на землю может быть оценена по формуле:

$$I_c = 3\omega U_\phi (C_{\Sigma 1} + C_{\Sigma 2}) \cdot 10^{-6}, \quad (4.1)$$

Т а б л и ц а 6 – Варианты заданий для выполнения РГР

№ вар	Исходные данные 1 группы			Исходные данные 2 группы		Исходные данные 3 группы	
	Номинальное напряжение ВЛ, кВ	Протяженность сети, км		Усредненная погонная емкость мкФ/км			Тип опор для ВЛ
		ВЛ	КЛ	ВЛ	КЛ		
I	6	60	-	0,0043	-	ж/б	
II	6	-	35	-	0,27	-	
III	6	-	75	-	0,25	-	
IV	6	20	30	0,0043	0,25	дерево	
V	10	80	-	0,0047	-	ж/б	
VI	10	-	60	-	0,202	-	
VII	10	25	15	0,0047	0,18	дерево	
VIII	35	80	-	0,0044	-	ж/б	
IX	35	140	-	0,0048	-	дерево	
X	35	25	5	0,0045	0,19	ж/б	

где  $\omega = 314,16 \text{ 1/с}$  – угловая частота;

$C_{\Sigma 1}$  – суммарная фазовая емкость линий (воздушных и кабельных) в мкФ;

$C_{\Sigma 2}$  – суммарная емкость подстанционного оборудования (при отсутствии достоверных данных может быть принята приближенно  $C_{\Sigma 2} \approx 0,1C_{\Sigma 1}$ ).

Индуктивный ток дугогасящего реактора  $I_p = \frac{U_\phi}{x_p}$  должен быть равен емкостному, но в реакторах со ступенчатым регулированием этого добиться невозможно за счет большой разности токов смежных ответвлений, поэтому рекомендуется настройка с перекомпенсацией. При степени компенсации  $K_L = I_p / I_c$  остаточный ток может быть найден как:

$$I_s^{(0)} = I_c (1 - K_L). \quad (4.2)$$

### 4.3 Контрольные вопросы

4.3.1 Приведите числовые значения принятых уровней внутренних перенапряжений в установках различных номинальных напряжений.

4.3.2 Какие перенапряжения называются внутренними и от каких параметров оборудования они зависят?

4.3.3 Перечислите наиболее характерные случаи возникновения коммутационных и резонансных перенапряжений и укажите причины их возникновения.

4.3.4 Изложите методику расчета числа элементов в гирлянде изоляторов воздушной линии по длинам участков утечки тока и по средней напряженности мокроразрядных напряжений.

4.3.5 Поясните причины возникновения повторных зажиганий дуги между контактами выключателей.

4.3.6 В каких целях могут возникнуть резонансные перенапряжения на рабочей частоте?

4.3.7 Укажите, к каким последствиям может привести явление феррорезонанса.

4.3.8 Поясните принцип работы дугогасящей катушки и шунтового реактора.

4.3.9 Почему при наличии АПВ выключатель, работающий без повторных зажиганий, не исключает появления коммутационных перенапряжений на линиях?

4.3.10 Поясните принцип работы дугогасящего трансформатора.

## Список литературы

1 Кадомская К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. – Новосибирск, Энергия, 2006. – 350 с.

2 Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. / под ред. Е.С. Колечицкого. – М.: МЭИ, 2008. – 248 с.

3 Техника высоких напряжений. Л.П. Чайкина. – М.: Маршрут, 2005. – 232 с.

4 Техника высоких напряжений. Под ред. Богатенкова И.М. и др. – Санкт – Петербург, Энергоатомиздат, 2003. – 350 с.

5 Техника высоких напряжений. Под общей редакцией д.т.н., профессора Г.С. Кучинского. – Санкт – Петербург, Энергоатомиздат, 2003. – 606 с.

6 Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. / Под ред. В.П. Ларионова. – М.: ЭАИ, 1986. – 464 с.

7 Техника высоких напряжений. Теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. / Под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 472 с.

## Содержание

1 Общие положения.....	3
2 Расчетно-графическая работа №1. Атмосферные перенапряжения и защитное действие молниеотводов.....	4
3 Расчетно-графическая работа №2. Распространение электромагнитных волн и волновое сопротивление элементов электроустановки.....	8
4 Расчетно-графическая работа №3. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью.....	12
Список литературы.....	15

Жанар Керимбековна Оржанова

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Методические указания и задания по выполнению  
расчетно-графических работ  
для магистрантов профильной  
специальности 6М071800 – Электроэнергетика

Редактор Л.Т. Сластихина  
Специалист по стандартизации Н.К. Молдабекова

Подписано в печать *10.12.18г*  
Тираж 15 экз.  
Объем 0.875 уч. изд. л.

Формат 60x84 1/16  
Бумага типографская №1  
Заказ № *113* Цена 400 тенге

Копировально-множительное бюро  
некоммерческого акционерного общества  
«Алматинский университет энергетики и связи»  
050013 Алматы, ул. Байтурсынова, 126