

Министерство образования Российской Федерации
Томский политехнический университет

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИДО

_____ Федоров А.Ф.

“ _____ ” _____ 2002 г.

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Рабочая программа, методические указания и контрольные задания
для студентов специальностей
100200 “Электроэнергетические системы и сети”,
100400 “Электроснабжение”, 210400 “Релейная защита и автоматизация
электроэнергетических систем” Института дистанционного образования

Семестр	9	10
Лекции, часов	2	10
Лабораторные работы, часов		10
Контрольная работа		1
Самостоятельная работа, часов		78
Форма контроля		зачет

Томск 2002

УДК 621.315

Техника высоких напряжений: Раб. программа, метод. указ. и контр. задания для студентов спец. 100200 “Электроэнергетические системы и сети”, 100400 “Электроснабжение”, 210400 “Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем” ИДО / Сост. Н.Б. Вишневецкая, Ю.И. Кузнецов, Ю.Н. Леонтьев, М.Т. Пичугина. - Томск: Изд. ТПУ, 2002. - 28 с.

Рабочая программа, методические указания и контрольные задания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры Техника и электрофизика высоких напряжений 18 октября 2001 г.

Зав. кафедрой ТЭВН, проф., д.т.н. _____ Лопатин В.В.

Аннотация

Рабочая программа по дисциплине “Техника высоких напряжений” предназначена для студентов специальностей 100200 “Электроэнергетические системы и сети”, 100400 “Электроснабжение”, 210400 “Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем” ИДО ТПУ.

В рабочей программе приводится программа курса “Техника высоких напряжений”, список рекомендуемой литературы, контрольные вопросы и задачи, методические указания по их выполнению, список лабораторных работ, варианты контрольных заданий.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Развитие электрификации нашей страны, рост рабочих напряжений электроустановок связаны с решением ряда проблем, важнейшей среди которых является создание электротехнического оборудования. Эта проблема в свою очередь определяется широким кругом вопросов, связанных с электрической изоляцией электрооборудования. Этот комплекс вопросов, рассматриваемых в курсе “Техника высоких напряжений” (ТВН), имеет первостепенное значение для специалистов в области электроэнергетики и является основополагающим при подготовке инженеров-электриков.

При изучении материала студент должен понять физику явления, уметь оценить или рассчитать прочность изоляции и возможные перенапряжения. В курсе “Техника высоких напряжений” широко используются знания курсов “Теоретические основы электротехники”, “Электрические материалы” и других дисциплин.

Программа, методические указания и контрольные задания по курсу “Техника высоких напряжений” предназначены для самостоятельного изучения студентами-заочниками специальностей 100200, 100400, 210400.

В процессе работы над курсом ТВН студенты должны выполнить 5 лабораторных работ и одну контрольную работу, содержание которой определяется индивидуальным заданием.

В случае затруднений, возникающих при изучении отдельных разделов курса техники высоких напряжений, студент должен обратиться на кафедру ТЭВН за устной или письменной консультацией по адресу 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, деканат ИДО.

2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Разряды в газах

Роль газовых диэлектриков в изоляции электрических установок и аппаратов высокого напряжения. Общая характеристика различных форм газового разряда. Электронные лавины в газах. Условие самостоятельности разряда. Разрядные напряжения в равномерном поле. Зависимость разрядного напряжения от давления. Газы с повышенной диэлектрической прочностью. Закон подобия разрядов в неравномерном поле.

Искровой разряд при постоянном и переменном напряжении в промежутках стержень-стержень и стержень-плоскость. Влияние полярности, объемных зарядов. Роль барьеров. Поправки на плотность и влажность воздуха.

Корона как форма незаконченного самостоятельного разряда. Корона на линиях электропередачи при переменном и постоянном напряжении. Потери на корону при переменном напряжении. Расщепление проводов.

Развитие разряда во времени. Время запаздывания разряда. Зависимость времени запаздывания разряда от подсветки, напряжения, материала электродов, состояния поверхности электродов, размеров искрового промежутка.

Стандартная и срезанная волны импульса, их параметры. Пробой воздушной изоляции на импульсном напряжении. Время разряда и время запаздывания разряда при импульсах, коэффициент импульса. Минимальные и пятидесятипроцентные разрядные напряжения. Вольтсекундные характеристики и их значение при координации изоляции. Роль полярности.

Поверхностный разряд в равномерном и неравномерном поле. Методы повышения разрядных напряжений в практических конструкциях (применение экранов, ребер, выравнивание распределения напряжения при помощи проводящих покрытий). Разряд вдоль загрязненной и увлажненной поверхности.

2.2. Испытательные установки и измерение высоких напряжений

Испытательные трансформаторы, особенности их работы и устройства. Каскадные схемы соединения испытательных трансформаторов.

Схемы выпрямления переменного тока. Схемы умножения напряжения. Каскадный генератор постоянного высокого напряжения, его схема и принцип действия.

Генератор импульсных напряжений (ГИН) и тока (ГИТ). Работа генератора, схема замещения ГИН в разряде. Связь между параметрами стандартной волны и параметрами ГИН. Конструкции ГИН.

Электростатические вольтметры, принцип действия, конструкции и пределы измерений. Шаровые разрядники для измерения напряжения. Принцип измерения, погрешности при измерении, поправки на температуру и давление. Таблицы для шаровых разрядников. Осциллографы и делители напряжения. Схемы замещения делителей, типы делителей и требования к ним.

Правила безопасности работы при измерении высоких напряжений.

2.3. Изоляция и испытание изоляции установок высокого напряжения

Классификация изоляторов. Линейные и опорные изоляторы: конструкции и характеристики. Выравнивание напряжения по гирлянде изоляторов. Выравнивающая арматура. Проходные изоляторы с воздушной полостью, маслonaполненные вводы, вводы конденсаторного типа. Проходные изоляторы, выравнивание поля с помощью обкладок. Условия работы изоляторов в эксплуатации. Электрические характеристики изоляторов. Развитие и современное состояние производства изоляторов в России.

Виды высоковольтных конденсаторов. Изоляция конденсаторов. Материалы, применяемые в конденсаторах в качестве изоляции. Режимы работы различных конденсаторов. Производство конденсаторов в России.

Изоляция трансформаторов. Конструкция изоляции трансформаторов. Диэлектрики, применяемые для изоляции трансформаторов. Внешняя и внутренняя изоляция трансформаторов. Классификация внутренней изоляции. Испытания изоляции трансформаторов.

Изоляция вращающихся машин. Конструкция изоляции, типы изоляции статорных обмоток, материалы, применяемые для изоляции вращающихся машин. Испытания изоляции машин.

Изоляция высоковольтных кабелей. Конструкции силовых кабелей. Основные диэлектрики, применяемые в кабелях. Испытания силовых кабелей.

Задачи профилактических испытаний изоляции. Методы профилактических испытаний изоляции, обнаружение дефектов с помощью профилактики. Аппаратура, применяемая для профилактических испытаний. Нормы и сроки испытаний изоляции, меры безопасности при профилактических испытаниях.

2.4. Перенапряжения в энергетических системах

Общая характеристика перенапряжений. Классификация перенапряжений. Виды воздействия перенапряжений на изоляцию.

Волновые процессы в линиях без потерь. Отражение и преломление волн. Многократные отражения. Правило Петерсена. Прохождение волн через индуктивности или мимо емкости. Падение волн на колебательный контур. Уравнение многопроводной системы и их применение. Затухание и искажение волн под действием сопротивления земли и короны.

Схема замещения трансформатора при нестационарных режимах. Начальное распределение напряжения. Входная емкость. Колебания в обмотках трансформатора с изолированной и заземленной нейтралью. Нерезонирующие и слабоколеблющиеся обмотки. Различные схемы и устройства для полной и частичной компенсации. Особенности волновых процессов в трехфазных трансформаторах и автотрансформаторах. Переход волн с одной обмотки на другую. Распространение волн в обмотках вращающихся машин.

Атмосферные перенапряжения. Развитие разряда молнии. Электромагнитное поле канала молнии. Основные параметры молнии. Молниеотводы и их зоны защиты. Грозозащита ЛЭП. Перенапряжения прямого удара молнии в опору, в трос, в провод. Защитный уровень линии. Индуктированные перенапряжения. Вероятность перекрытия изоляции линии. Вероятность перехода искрового разряда в дуговой и вероятное число отключений линии.

Трубчатые разрядники, их конструкции, работа и установка на линиях. Защита искровыми промежутками при наличии дугогасящих катушек.

Грозозащита подстанций. Защита ОРУ от прямых ударов молнии. Защита подстанций от набегающих волн. Типовые схемы защиты подстанций различного номинального напряжения. Принцип действия, конструкция и назначение отдельных элементов вентильных разрядников. Защитное действие вентильного разрядника. Вентильные разрядники в схемах защиты. Нелинейные ограничители перенапряжений. Их отличие от трубчатых и вентильных разрядников.

Особенности защиты вращающихся машин, работающих на воздушную сеть. Типовые схемы защиты.

Режимы нейтрали электрических систем. Влияние режима нейтрали на надежность электроснабжения и на импульсный уровень изоляции.

Резонансные перенапряжения. Перенапряжения на основной частоте в ненагруженной электропередаче. Влияние насыщения стали трансформаторов, короны и предвключенной индуктивности на перенапряжения. Роль поперечных и продольных компенсирующих устройств. Феррорезонансные перенапряжения при несимметричном отключении фаз в системах с изолированной нейтралью.

Коммутационные перенапряжения. Перенапряжения при включении и отключении ненагруженных линий. Меры ограничения. Перенапряжения при отключении ненагруженных трансформаторов. Перенапряжения при АПВ. Статистические характеристики коммутационных перенапряжений. Перенапряжения в системах с изолированной нейтралью при дуговых замыканиях одной фазы на землю. Компенсация емкостного тока. Дугогасящие аппараты. Влияние дугогасящей катушки на скорость восстановления напряжения. Смещение нейтрали. Методы уменьшения смещения нейтрали. Конструкции дугогасящих аппаратов и их выбор.

3. СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Перечень лабораторных работ

1. Разряды в воздухе при постоянном напряжении (2 часа).
2. Распределение напряжения по гирлянде подвесных изоляторов (2 часа).
3. Профилактические испытания изоляции высоковольтного трансформатора (2 часа).
4. Генератор импульсных напряжений Аркадьева - Маркса и формирование полной и срезанной стандартных волн (2 часа).
5. Определение вольтамперной характеристики вентильного разрядника (2 часа)

4. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

4.1. Общие методические указания

Ниже приведены контрольные вопросы по всем разделам программы. В этих заданиях отражены основные положения курса, следовательно, и экзаменационных билетов. На каждое задание (вопросы и задача) необходимо составить краткий исчерпывающий письменный ответ.

Для контроля за ходом самостоятельной работы над материалом студент обязан в течение семестра выслать на факультет контрольную работу, номер варианта которой ему указан в шифре группы (например: 3-9240/27 - номер варианта 27). Число вариантов заданий равно 40. Если

цифра в шифре превышает 40, то номер варианта определяется как разность между этой цифрой и числом 40 (например: 3-9240/53, номер варианта 13).

К выполнению контрольной работы следует приступить после изучения всех разделов программы курса “Техника высоких напряжений”. По объему работа не должна превышать 20...30 страниц формата ученической тетради. Контрольная работа выполняется четко, разборчиво и аккуратно. Решения задач и ответы на вопросы поясняются схемами и эскизами. При оформлении работы должны быть оставлены поля для заметок преподавателя. В конце работы указывается использованная литература, дата выполнения работы и ставится подпись студента.

4.2. Варианты контрольных заданий

№ варианта	№ вопроса	Вариант к задаче 1	Вариант к задаче 2	Вариант к задаче 3	Вариант к задаче 4
1	14, 53, 62	3	5	10	2
2	9, 43, 69	1	4	6	3
3	104, 18, 75	8	2	5	7
4	111, 25, 80	10	5	3	6
5	11, 54, 60	1	8	6	4
6	29, 53, 82	5	2	8	10
7	21, 2, 90	1	7	3	6
8	105, 30, 63	9	2	6	4
9	5, 106, 95	5	9	8	1
10	112, 20, 71	2	6	10	3
11	31, 12, 97	3	1	7	6
12	13, 52, 67	7	5	4	8
13	26, 113, 83	9	1	3	7
14	51, 8, 76	8	10	2	5
15	110, 35, 98	4	9	1	2
16	107, 30, 59	7	1	4	9
17	19, 55, 88	1	8	2	3
18	114, 39, 77	5	2	9	6
19	50, 22, 91	9	6	3	10
20	36, 115, 65	1	10	7	4
21	23, 4, 87	5	2	1	8
22	38, 3, 73	9	6	3	7
23	116, 37, 96	3	10	7	4
24	15, 44, 89	5	4	1	8
25	108, 42, 61	8	6	5	2
26	6, 27, 84	2	10	7	6
27	40, 100, 92	1	3	5	8
28	49, 1, 70	9	2	4	1

29	33, 99, 81	6	10	3	5
30	45, 12, 66	10	7	1	4
31	16, 48, 78	6	1	8	2

Окончание табл.

32	109, 32, 94	3	7	2	9
33	56, 6, 72	10	4	8	3
34	28, 58, 85	4	1	5	9
35	7, 46, 64	7	5	2	6
36	101, 34, 93	7	10	6	3
37	103, 17, 74	3	8	1	9
38	24, 57, 86	7	4	9	2
39	41, 102, 79	3	8	5	10
40	47, 10, 68	1	4	9	6

4.3. Контрольные вопросы и задачи

Разряды в газах, изоляции электрических установок, высоковольтное оборудование и измерения

1. Электрон движется в равномерном поле с напряженностью $E = 30$ кВ/см. Какое расстояние должен пройти электрон без столкновения для: а) ионизации одной молекулы водорода, азота, кислорода; б) освобождения электрона с поверхности катода из меди, стали, алюминия.

Указание: для расчета использовать таблицы 2.1, 2.2 [1, с. 17-21], [3, с. 8-22], [9, с.12-25].

2. Для фотоионизации газового промежутка шарового разрядника применяется облучение промежутка искровым разрядом. Нарисовать схему процесса фотоионизации и вычислить наибольшую длину волны, достаточную для: а) ионизация молекул водорода, азота, кислорода; б) освобождение электрона с поверхности катода из меди, стали, алюминия.

Указание: для расчета использовать таблицы 2.1, 2.2, [1, с. 17-21], [3, с. 8-22], [9, с. 12-25].

3. Описать развитие разряда в газе в промежутке стержень-плоскость при положительной и отрицательной полярности стержня. Рекомендуемая литература: [1, с. 38-43], [3, с. 35-47], [9, с. 62-69].

4. Описать развитие разряда в длинных (километры) воздушных промежутках. Молния - разновидность искрового разряда. Рекомендуемая литература: [1, с. 45-49], [2, с. 227-229], [3, с.40-47], [9, с. 208-217].

5. Привести графики зависимости $U_p = f(p \cdot S)$, пояснить ход кривой Пашена. Привести формулы разрядного напряжения в однородном поле. Рекомендуемая литература: [1, с. 31-35], [2, с. 24-27], [3, с.32-35], [9, с. 56-62].

6. Пояснить понятие “лавины электронов” в газе. Описать развитие разряда в промежутке с однородным полем. Как определить число электро-

нов в лавине? Рекомендуемая литература: [1, с. 24-26], [2, с. 21-22], [3, с. 22-24], [9, с.25].

7. Описать возникновение коронного разряда на проводах ЛЭП при переменном напряжении. Назвать технические мероприятия по уменьшению потерь на корону. Рекомендуемая литература: [1, с. 82-101], [2, с. 51-57], [3, с. 60-67], [9, с. 159].

8. Дать определение составляющих времени разряда в газе. Какая составляющая является определяющей при разряде в однородном поле? Какие факторы влияют на составляющие времени разряда? Рекомендуемая литература: [1, с. 49-54], [2, с. 34-35], [3, с. 47-48], [9, с. 69-71].

9. Описать стримерную теорию развития разряда в газе при нормальных и повышенных давлениях. Назвать виды разрядов в газах, их отличительные параметры. Рекомендуемая литература: [1, с. 26-31], [2, с. 28-29], [3, с. 29-32], [9, с. 29].

10. Дать определение вольтсекундной характеристике, описать методику построения их. Привести вольтсекундные характеристики для газа в слабонеоднородном поле и в резконеоднородном поле. Показать роль вольтсекундных характеристик в ТВН. Рекомендуемая литература: [1, с. 54-57], [2, с. 34-38], [3, с. 78-88], [9, с. 70].

11. Пояснить понятие самостоятельного разряда в однородном поле. Привести его математическое выражение. Какими способами осуществляется вторичная ионизация? Рекомендуемая литература: [1, с. 26-31], [2, с. 22-23], [3, с. 22-26], [9, с. 27].

12. Описать возникновение скользящего разряда вдоль поверхности твердого диэлектрика в неоднородном поле. Пояснить влияние удельной поверхностной емкости на разрядное напряжение. Рекомендуемая литература: [1, с. 77-83], [2, с. 68-71], [3, с. 54-57], [9, с. 82; 45], [10, с. 119].

13. Описать разряд вдоль увлажненной и загрязненной поверхности твердого диэлектрика. Какие факторы и как влияют на разрядное напряжение перекрытия? Рекомендуемая литература: [1, с. 83-84], [2, с. 71-73], [3, с. 89-98], [10, с. 132].

14. Пояснить физическую суть влияния барьеров на разрядное напряжение. Привести график зависимости разрядного напряжения от расстояния между барьером и острием в промежутке, пояснить ход кривых. Назвать области применения барьеров. Рекомендуемая литература: [1, с. 43-45], [10, с. 27, 182].

15. Назвать виды ионизационных процессов при разрядах в газе, привести их схемы. Пояснить физический смысл коэффициента ударной ионизации α . Рекомендуемая литература: [1, с. 17-24], [2, с. 16-22], [3, с. 12-22].

16. Привести вольткулоновскую характеристику коронирующего провода. Как определить потери по вольткулоновской характеристике? Приведи-

те другие характеристики коронирующего провода и поясните их. Рекомендуемая литература: [1, с. 92-96], [3, с. 68-75], [9, с. 161].

17. Описать процесс коронирования ЛЭП на постоянном напряжении. Как определить потери на корону при постоянном напряжении? Рекомендуемая литература: [1, с. 86-89], [2, с. 48-51], [3, с. 60-67], [9, с. 157].

18. Пояснить закон подобия разрядов. Привести условие самостоятельности разряда и пояснить его. Рекомендуемая литература: [1, с. 37-38], [2, с. 27-31], [2, с. 32-35], [9, с. 64].

19. Что такое коэффициент ударной ионизации электронами? Поясните связь между коэффициентом ударной ионизации и длиной свободного пробега электронов. Рекомендуемая литература: [1, с. 21-24], [2, с. 16-21], [3, с. 8-14], [9, с. 18].

20. Дать описание испытательных трансформаторов (отличие силовых трансформаторов от испытательных, особенности работы, устройства, конструктивное исполнение). Рекомендуемая литература: [3, с. 464-464], [5, с. 228-234], [6, с. 205-209], [9, с. 387].

21. Нарисовать электрические схемы испытательных трансформаторов и диаграммы распределения напряжения вдоль обмотки трансформаторов с одним и двумя высоковольтными выводами. Достоинства и недостатки таких трансформаторов. Рекомендуемая литература: [5, с. 228-234], [9, с. 387].

22. Нарисовать конструктивное исполнение и электрическую схему каскадного соединения трех трансформаторов с питанием каждого последующего трансформатора от предыдущего. Достоинства и недостатки такой схемы соединения. Рекомендуемая литература: [3, с. 464-465], [5, с. 235-236], [6, с. 205-207].

23. Нарисовать конструктивное исполнение и электрическую схему каскадного соединения трех трансформаторов с питанием от дополнительных переходных трансформаторов. Достоинства и недостатки такой схемы соединения. Рекомендуемая литература: [3, с. 464-467], [6, с. 205-207].

24. Задачи высоковольтных испытаний и методы испытаний. Рекомендуемая литература: [3, с. 460-462], [6, с. 193-203].

25. Нарисовать и описать работу однополупериодной и двухполупериодной схем выпрямления переменного тока. Дать диаграммы выходного напряжения и пояснить роль сглаживающего емкостного фильтра. Рекомендуемая литература: [3, с. 468-469], [5, с. 241-243], [6, с. 213-214].

26. Нарисовать и описать работу одной из схем выпрямления с удвоением напряжения. Дать диаграмму выходного напряжения. Пояснить принцип получения постоянного напряжения с помощью каскадных генераторов постоянного тока. Рекомендуемая литература: [3, с. 468-469], [5, с. 244-247], [6, с. 213-217].

27. Нарисовать и описать работу одноступенчатого генератора импульсных напряжений. Привести стандартную форму импульса и указать основные ее параметры. Рекомендуемая литература: [5, с. 247-251].

28. Нарисовать схему многоступенчатого генератора импульсных напряжений. Назначение отдельных элементов схемы, соотношения отдельных элементов в схеме, связь параметров импульсной волны с параметрами схемы. Рекомендуемая литература: [3, с. 469-474], [5, с. 251-258], [6, с. 217-224], [9, с. 290].

29. Нарисовать схему многоступенчатого генератора импульсных напряжений и описать ее работу. Пояснить как осуществляется регулирование амплитуды получаемого импульса, частоты следования импульсов и получение срезанного импульса. Рекомендуемая литература: [3, с. 469-474], [5, с. 251-258], [6, с. 217-224].

30. Нарисовать принципиальную электрическую схему электростатического вольтметра. Описать принцип измерения напряжения, достоинства и недостатки, область их применения. Рекомендуемая литература: [3, с. 486-491], [5, с. 268-270], [6, с. 148-152].

31. Нарисовать эскиз включения шаровых разрядников, описать принцип измерения напряжения шаровыми разрядниками, требования к ним при измерении напряжения. Рекомендуемая литература: [3, с. 480-486], [5, с. 261-268], [6, с. 153-157].

32. Пояснить методики измерения шаровыми разрядниками постоянных, переменных и импульсных напряжений. Рекомендуемая литература: [3, с. 480-486], [5, с. 261-268], [6, с. 153-157].

33. Описать и пояснить требования к шаровым разрядникам при измерении напряжения. Особенности при измерении импульсных напряжений. Рекомендуемая литература: [3, с. 480-486], [5, с. 261-268], [6, с. 153-157].

34. Нарисовать схему замещения омического делителя при измерении переменных и импульсных напряжений. Описать требования, предъявляемые к делителям, и факторы, влияющие на погрешность измерения. Рекомендуемая литература: [3, с. 493-501], [5, с. 272-276], [6, с. 188-193].

35. Нарисовать схему замещения емкостного делителя напряжения. Описать требования к делителям и факторы, влияющие на погрешность измерения. Рекомендуемая литература: [3, с. 501-506], [5, с. 272-276], [6, с. 188-193].

36. Нарисовать и описать схемы генератора коммутационных волн на основе испытательных трансформаторов. Привести типичные формы получаемых волн в таких схемах. Рекомендуемая литература: [3, с. 474-476].

37. Нарисовать и описать работу схемы генератора коммутационных волн на основе каскада испытательных трансформаторов. Привести типичные формы волн, получаемых в таких схемах. Рекомендуемая литература: [3, с. 476-478], [5, с. 258-260], [6, с. 224-225].

38. Нарисовать и описать работу схемы генератора коммутационных волн на основе генератора импульсных напряжений. Привести формы волн, получаемых в таких схемах. Рекомендуемая литература: [3, с. 478-479], [5, с. 260-261], [6, с. 225-226].

39. Нарисовать электрическую схему и описать метод измерения амплитуды напряжения с помощью конденсаторов и выпрямителей (по величине выпрямленного тока и напряжения на конденсаторе). Рекомендуемая литература: [3, с. 491-493], [5, с. 270-272], [6, с. 157-160].

40. Описать процесс возникновения частичных разрядов в газовой полости твердого диэлектрика при переменном напряжении, пояснить характер изменения напряжения. Назвать и охарактеризовать методы регистрации частичных разрядов. Рекомендуемая литература: [1, с. 222-226], [2, с. 122-125], [3, с. 138-143], [9, с. 181], [10, с. 41].

41. Описать методы контроля изоляции по $\tan \delta$. Какие дефекты можно обнаружить при измерении $\tan \delta$? Нарисовать и объяснить принцип действия аппаратуры для измерения $\tan \delta$. Рекомендуемая литература: [1, с. 216-221].

42. Привести графики и объяснить зависимость емкости от частоты для доброкачественной и дефектной изоляции. Какие дефекты можно обнаружить, используя данный метод. Нарисовать и объяснить принцип действия прибора, используемого в данном методе. Рекомендуемая литература: [1, с. 217-222], [2, с. 188-190].

43. Привести схему замещения неоднородного диэлектрика и описать процессы в диэлектрике при воздействии электрического поля. Какая связь между характером изменения тока абсорбции и качеством изоляции? Рекомендуемая литература: [1, с. 213-216], [2, с. 175-180].

44. Описать конструкцию изоляции силовых трансформаторов 220 кВ. Назвать и пояснить методы выравнивания напряжения на внутренней изоляции трансформаторов. Рекомендуемая литература: [1, с. 158-164], [2, с. 201-207], [3, с. 426-436].

45. Описать типы линейных изоляторов и привести их эскизы. Указать преимущества и недостатки различных типов изоляторов. Какие электрические характеристики имеют линейные изоляторы? Рекомендуемая литература: [1, с. 106-119], [2, с. 81-85], [3, с. 410-415].

46. Привести кривую распределения напряжения вдоль гирлянды подвесных изоляторов, объяснить характер кривой. С какой целью и какими средствами проводят выравнивание распределения напряжения вдоль гирлянды? Рекомендуемая литература: [1, с. 121-125], [2, с. 91-92], [3, с. 410-415], [9, с. 95].

47. Описать развитие разряда по увлажненной и загрязненной поверхности изолятора. Какие изоляторы применяются в районах с сильным загряз-

нением? Привести их эскизы. Рекомендуемая литература: [1, с. 83-84, 153-156], [2, с. 71-73], [3, с. 89-94].

48. Описать изоляцию линий электропередачи на деревянных опорах. Каким образом определяются минимальные изоляционные расстояния? Назвать требования, предъявляемые к изоляции ЛЭП. Рекомендуемая литература: [1, с. 130-131], [2, с. 99-101].

49. Описать конструкции вводов на напряжение 35 кВ, Как осуществляется регулирование электрического поля во вводах конденсаторного типа? Рекомендуемая литература: [1, с. 137-148], [2, с. 197-201], [3, с. 418-426].

50. Описать конструкцию кабелей с вязкой пропиткой. Как развивается ветвистый разряд в кабеле? Назвать области применения кабелей с вязкой пропиткой. Рекомендуемая литература: [1, с. 189-195], [2, с. 208-216], [3, с. 436-438, 155-160].

51. Описать конструкции маслонаполненных кабелей. Указать области применения данных кабелей. Каким испытаниям подвергается изоляция силовых кабелей? Рекомендуемая литература: [1, с. 145-202], [2, с. 208-216], [3, с. 438-440].

52. Описать конструкцию силовых конденсаторов. Какие изоляционные материалы применяются в конденсаторах? Рекомендуемая литература: [1, с. 202-213], [2, с. 216-220], [3, с. 445-450].

53. Привести эскизы основных элементов статорных обмоток электрических машин. Какие материалы используются в качестве изоляции в электрических машинах? Указать меры по устранению коронирования. Рекомендуемая литература: [1, с. 176-185], [2, с. 221-226], [3, с. 450-457].

54. Описать методику испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением. Указать область применения и норма испытаний. Рекомендуемая литература: [1, с. 148-152], [2, с. 167-170], [3, с. 190-197].

55. Описать основные методы профилактики изоляции. С какой целью проводятся профилактические испытания? Рекомендуемая литература: [1, с. 212-243], [2, с. 163-167].

56. Описать развитие ионизационных процессов в маслобарьерной изоляции. Почему барьеры увеличивают электрическую прочность? Рекомендуемая литература: [2, с. 136-137], [3, с. 47-154].

57. Описать процесс возникновения частичных разрядов в бумажно-масляной изоляции. Какие факторы влияют на электрическую прочность бумажно-масляной изоляции? Рекомендуемая литература: [2, с. 129-13], [3, с. 138-139, 143-145].

58. Описать методику выбора числа изоляторов в гирлянде. Какие изоляторы используются на линиях электропередачи? Привести их эскизы. Рекомендуемая литература: [1, с. 114-118, 126-129], [1, с. 82-85, 95-96], [3, с. 410-415].

Перенапряжения в электрических системах

59. Описать развитие лидерного разряда молнии и обратного разряда. Ток молнии, связь тока молнии с плотностью заряда в лидерном канале и скорость обратного разряда. Расчетная форма волны тока молнии. Рекомендуемая литература: [1, с. 224-250], [9, с. 208-215].

60. Указать основные параметры разряда молнии. Определить вероятность того, что амплитуда тока молнии будет равна или больше 50 кА, 100 кА, 150 кА. Определить вероятность того, что крутизна фронта тока молнии будет равна или больше 10 кА/мкс, 25 кА/мкс, 50 кА/мкс. Рекомендуемая литература: [2, с. 229-233], [9, с. 210-215].

61. Пояснить структуру электромагнитного поля канала молнии. Рекомендуемая литература: [1, с. 250-251], [2, с. 233-234].

62. Как характеризуется интенсивность грозовой деятельности? Как влияет она на грозопоражаемость энергетических объектов? Определить интенсивность гроз в районе Москвы, Новосибирска, Донбасса, Ташкента, Кавказского хребта. Рекомендуемая литература: [1, с. 252], [2, с. 233], [9, с. 215-217].

63. Написать основные дифференциальные уравнения распространения электромагнитной волны вдоль линии. Определить скорость распространения волны в среде с $\varepsilon = 1$, $\mu = 1$ (воздушная линия), $\varepsilon = 4$, $\mu = 1$ (кабельная линия). Какие значения имеют волновые сопротивления на воздушных и кабельных линиях? Рекомендуемая литература: [4, с. 265].

64. Рассчитать собственные и взаимные волновые сопротивления трехфазной линии с горизонтальным расположением проводов со средней высотой подвеса проводов 10 м, расстоянием между проводами 4 м и радиусом провода 1 см. Рекомендуемая литература: [1, с. 255-256], [2, с. 252].

65. Три фазы линии с горизонтальным расположением проводов включаются на общий источник $U_0 = 1000$ кВ. Волновые сопротивления равны: $Z_{11} = Z_{22} = 400$ Ом, $Z_{12} = Z_{23} = 120$ Ом, $Z_{13} = 90$ Ом. Рассчитать эквивалентное волновое сопротивление каждой фазы, а также общее волновое сопротивление всех трех фаз. Определить ток в каждой фазе. Рекомендуемая литература: [1, с. 256], [2, с. 253].

66. По двум тросам со средней высотой подвеса 18 м распространяется волна напряжения $U_0 = 1000$ кВ. Линия одноцепная с горизонтальным расположением проводов. Средняя высота подвеса проводов 12 м. Расстояние между проводами 3 м, радиус провода 1,5 см, радиус троса 1 см. Тросы расположены симметрично относительно среднего провода. Рассчитать напряжения, наводимые на проводах и соответствующие коэффициенты связи. Рекомендуемая литература: [1, с. 257], [2, с. 253-254].

67. Волна перенапряжений прямоугольной формы амплитудой 200 кВ переходит с линии Z_1 на линию Z_2 через отрезок линии Z_0 длиной 100 м. Рассчитать и построить форму проходящей волны. Рассмотреть два случая:

$Z_1 = Z_2 = 400 \text{ Ом}$, $Z_0 = 40 \text{ Ом}$; 2. $Z_1 = Z_2 = 50 \text{ Ом}$, $Z_0 = 400 \text{ Ом}$. Рекомендуемая литература: [1, с. 258-260], [2, с. 245-247].

68. Задачу 67 решить, заменив отрезок линии с волновым сопротивлением Z_0 сосредоточенной емкостью или индуктивностью. Привести эквивалентные схемы, рассчитать и построить форму проходящей волны. Рекомендуемая литература: [1, с. 260]; [2, с. 247].

69. По линии с волновым сопротивлением 50 Ом распространяется прямоугольная волна напряжения $\tau_B = 20 \text{ мкс}$ и амплитудой $U_0 = 100 \text{ кВ}$. На конце линии присоединена емкость $C = 1 \text{ мкФ}$. Рассчитать форму волны на емкости.

Указание: Волну заданной формы разложить на две прямоугольные бесконечной длительности волны обратной полярности, сдвинутых во времени на $\tau = \tau_B$. Для каждой составляющей построить напряжение на емкости и затем сложить с учетом полярности и сдвига во времени. Рекомендуемая литература: [1, с. 260].

70. Рассчитать искажение волны на проводе вследствие импульсной короны при пробеге расстояния $l = 2 \text{ км}$. Форма волны стандартная $1,2/50 \text{ мкс}$, амплитуда 1000 кВ , напряжение начала короны $U_K = 200 \text{ кВ}$. Полярность волны - отрицательная. Высота подвеса провода 10 м , радиус провода $r = 1 \text{ см}$. Дать физическое объяснение искажения волны вследствие импульсной короны. Как влияет импульсная корона на коэффициент связи между проводами? Рекомендуемая литература: [1, с. 266-269], [2, с. 238-239].

71. Объяснить характер защитного действия молниеотводов. Привести и пояснить защитные зоны стержневых молниеотводов, а также расчет зоны защиты открытой подстанции от прямых ударов молнии. Рекомендуемая литература: [1, с. 271-279], [2, с. 263-270], [9, с. 219-230].

72. Построить зону защиты тросового молниеотвода. Высота крепления троса на опоре 22 м . Расположение проводов ЛЭП горизонтальное с расстоянием между проводами 4 м . Высота подвеса провода 16 м . Определить вероятность прорыва молнии на провод. Какие углы защиты применяются для надежного экранирования проводов? Рекомендуемая литература: [1, с. 279, 327], [2, с. 267-268].

73. Рассчитать потенциал на вершине молниеотвода решетчатой конструкции высотой 30 м при токе 100 кА , крутизне тока молнии 25 кА/мкс ; сопротивление молниеотводов 10 Ом . Рекомендуемая литература: [1, с. 280-281], [9, с. 228].

74. Что такое импульсный коэффициент заземления α и как он зависит от тока молнии, удельного сопротивления грунта ρ ? Определить импульсный коэффициент трубчатого электрода длиной $l = 3 \text{ м}$ в грунте $\rho = 2 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при импульсном токе $I = 25 \text{ кА}$, диаметр трубы $d = 50 \text{ мм}$, $E_{\text{ПР}}$ грунта 6 кВ/см . Рекомендуемая литература: [1, с. 294], [2, с. 278], [9, с. 224].

75. Указать допустимые пределы сопротивлений заземления опор линий электропередачи, заземляющих контуров станций и подстанций. Указать

основные правила выполнения заземляющих устройств станций и подстанций. Рекомендуемая литература: [1, с. 282-301], [2, с. 274-284].

76. Привести классификацию грунтов по их удельному сопротивлению. Какое влияние на ρ грунтов оказывают осадки, промерзание? Какое влияние на ρ грунта оказывает стекание импульсного тока с заземлителя? Рекомендуемая литература: [1, с. 286-289], [2, с. 270-284], [9, с. 224].

77. Дать физическое объяснение влиянию протяженности заземлителя на его импульсное сопротивление. Как связан импульсный коэффициент α с длиной протяженного заземлителя и с током молнии? Каковы предельные длины протяженных заземлителей? Рекомендуемая литература: [1, с. 295-298], [2, с. 270-282], [9, с. 224].

78. Пояснить принцип защиты изоляции разрядником. Перечислить типы разрядников, применяемых для защиты от перенапряжений. Указать недостатки искровых защитных промежутков. Рекомендуемая литература: [1, с. 302-318], [2, с. 284-307], [9, с. 230].

79. Описать конструкцию трубчатых разрядников (РТ). Указать их основные характеристики. Как выбираются РТ по пределам отключаемых токов? Рекомендуемая литература: [1, с. 303-309], [2, с. 287-293], [9, с. 233].

80. Указать основные элементы и характеристики вентильного разрядника. Привести вольтамперную характеристику (ВАХ) рабочего сопротивления разрядника и объяснить физическую природу нелинейности ВАХ. Какие материалы применяются для рабочих сопротивлений? На какие предельные импульсные токи должно быть рассчитано рабочее сопротивление? Рекомендуемая литература: [1, с. 309-312], [2, с. 293-297], [9, с. 237].

81. Описать конструкцию единичного искрового промежутка вентильных разрядников. Как осуществляется гашение дуги сопровождающего тока в искровых промежутках? Почему для гашения дуги необходимо разделение искрового промежутка разрядника на большое число единичных промежутков? Рекомендуемая литература: [1, с. 312-313], [2, с. 297-299], [9, с. 237].

82. Описать конструкцию разрядника типа РВС. Рекомендуемая литература: [1, с. 313-315], [2, с. 299-303].

83. Описать конструкцию искрового промежутка с вращающейся дугой. Указать значение этих промежутков для улучшения характеристик вентильных разрядников. Рекомендуемая литература: [1, с. 315-318], [2, с. 300-303], [9, с. 241-242].

84. Как возникают атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи? Определить число разрядов в линию длиной 150 км при средней высоте подвеса троса 12 м; среднее число грозových часов в году равно 30. Рекомендуемая литература: [1, с. 319-320], [2, с. 309-310], [9, с. 217].

85. Определить вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу при междуфазном перекрытии на деревянных опорах 110 кВ и при перекрытии с фазы на землю. Изоляция линии-7 изоляторов П-4,5 в гирлянде,

расстояние между фазами 3 м. Длина пути перекрытия по дереву на землю равна 12 м. От чего зависит вероятность установления силовой дуги? Рекомендуемая литература: [1, с. 319-320], [2, с. 310], [9, с. 251].

86. Рассчитать индуктированное перенапряжение на проводах линии со средней высотой подвеса 10 м. Разряд молнии с током 150 кА произошел на расстоянии 100 м от линии. Рекомендуемая литература: [1, с. 322], [2, с. 313], [9, с. 257].

87. Рассчитать защитный уровень линии 220 кВ на металлических опорах без троса. Изоляция линии - 12 изоляторов П-4,5 в гирлянде (на промежуточных опорах). Определить также вероятность перехода на этой линии импульсного перекрытия в силовую дугу. Рекомендуемая литература: [1, с.320-324], [2, с. 310-315].

88. Рассчитать защитный уровень линии 220 кВ на деревянных опорах без троса. Расположение проводов горизонтальное с высотой подвеса 12 м, расстояние между фазами 4,5 м, гирлянда содержит 12 изоляторов П-4,5. Определить также вероятность перехода на этой линии импульсного перекрытия в силовую дугу на пути фаза-земля и фаза-фаза. Рекомендуемая литература: [1, с. 326], [2, с. 316].

89. Указать составляющие напряжения, воздействующие на изоляцию, при прямом ударе молнии в линию с тросом, дать оценку каждой из этих составляющих и указать какими мерами можно их снизить. Изложить метод расчета напряжения, воздействующего на изоляцию трос-провод при прямом ударе молнии в трос в середине пролета. Рекомендуемая литература: [1, с.326-332], [2, с. 317-323], [9, с. 258-262].

90. Оценить, в какой степени влияют на защитный уровень линии с тросом величины сопротивлений заземления опор, длины пролета, число тросов, коэффициент связи и уровень изоляции линии. Рекомендуемая литература: [1, с. 326-332], [2, с. 317-323], [9, с. 258-268].

91. Указать рекомендуемые способы грозозащиты линии: а) 220 кВ и выше; б) 110 кВ на металлических и железобетонных опорах; в) 110 кВ на деревянных опорах; г) 35 кВ на деревянных опорах; д) 35 кВ на металлических и железобетонных опорах; е) линий 3-10 кВ. Рекомендуемая литература: [1, с.333-334], [2, с. 325-326], [9, с. 250].

92. Изложить основные принципы защиты подстанций от волн, набегающих с линии. Нарисовать и дать обоснование принципиальным схемам грозозащиты подстанций. Рекомендуемая литература: [1, с. 335-337], [2, с.327-357], [9, с. 272].

93. Пояснить, как выбирается длина защищенного подхода ЛЭП и подстанции. Изложить методику определения длины защищенного подхода. Рекомендуемая литература: [1, с. 338;], [2, с. 345-346], [9, с. 279].

94. Рассчитать максимальное напряжение на изоляции подстанции 35 кВ, защищенной вентильным разрядником РВС-35, установленным по ходу волны после защищаемой изоляции на расстоянии $l = 30$ м. Емкость изо-

ляции принять равной нулю. Амплитуда волны $U_0 = 300$ кВ, форма волны стандартная 1,2/50 мкс. Привести форму напряжения на изоляции подстанции. Рекомендуемая литература: [1, с. 39-342], [2, с. 337-341].

95. Какое влияние на защиту подстанции оказывают крутизна набегающей волны, расстояние между разрядником и защищаемым оборудованием, число приключенных линий, емкость ошиновки и оборудования подстанции? Рекомендуемая литература: [1, 339-346], [2, с. 336-341].

96. Каким путем может осуществляться передача напряжения через обмотки трансформаторов на сторону генераторного напряжения? Опасны ли эти напряжения для генераторов? Описать схемы защиты генераторов, соединенных непосредственно с воздушными линиями, соединенных с воздушными линиями через короткие кабельные вставки, с индуктивностью в начале линии. Дать сравнительную оценку этим схемам. Рекомендуемая литература: [1, с. 359-365], [2, с. 353-361], [9, с. 284-287].

97. Указать достоинства и недостатки двух способов заземления нейтрали эффективного заземления и резонансного заземления. Как влияет режим нейтрали на импульсный уровень прочности изоляции электрической системы? Рекомендуемая литература: [1, с. 365-373], [9, с. 153].

98. Определить напряжение на здоровых фазах при однофазном коротком замыкании в системах с отношением $X_0/X_1 = 2, 3, 5$. Как влияет режим нейтрали на соотношение X_0/X_1 ? Рекомендуемая литература: [1, с. 365-373], [9, с. 358].

99. Изложить развитие перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в системах с незаземленной нейтралью. Каких величин достигают перенапряжения при перемежающемся характере горения дуги? Рекомендуемая литература: [1, с. 373-380], [2, с. 445-453], [9, с. 325-336].

100. В чем основная опасность длительности дугового замыкания на землю и почему необходимо гашение дуги? Рекомендуемая литература: [1, с. 373-380], [2, с. 445-453], [9, с. 335-336].

101. Описать метод компенсации емкостного тока замыкания на землю. Привести векторную диаграмму и формулу результирующего тока в месте замыкания на землю при наличии дугогасящей катушки. Рекомендуемая литература: [1, с. 380-385], [2, с. 453-455].

102. Описать, каким образом дугогасящие катушки способствуют гашению емкостного тока замыкания на землю. Рекомендуемая литература: [1, с. 380-385], [2, с. 453-455].

103. Изложить причину смещения нейтрали в сетях с дугогасящей катушкой при резонансной настройке катушки. Какими путями избегают недопустимых смещений нейтрали? Рекомендуемая литература: [1, с. 385-388], [2, с. 457-461].

104. Описать конструкцию дугогасящей катушки и привести рекомендации по выбору числа и места установки катушек. Рекомендуемая литература: [1, с. 388-393], [2, с. 460-461].

105. Описать развитие перенапряжений при отключении ненагруженных линий. Рекомендуемая литература: [1, с. 393-401], [2, с. 439-444], [9, с. 327].

106. Каких значений достигают перенапряжения при отключении ненагруженных линий? Каким образом можно полностью устранить возникновение перенапряжений при отключении ненагруженных линий? Описать процесс отключения холостой линии выключателем с шунтирующими сопротивлениями. Рекомендуемая литература: [1, с. 393-401], [2, с. 439-444], [9, с. 327].

107. Описать меры защиты от перенапряжений, возникающих при отключении ненагруженных линий. Пояснить защитное действие каждой из этих мер. Рекомендуемая литература: [1, с. 393-401], [9, с. 327].

108. Описать возникновение перенапряжений при включении ненагруженных линий электропередачи. Привести возможные величины перенапряжений данного вида. Рекомендуемая литература: [1, с. 454-457], [2, с. 414-424], [9, с. 347].

109. Пояснить физическую сущность перенапряжений при АПВ. Рекомендуемая литература: [1, с. 425-430], [9, с. 307].

110. Описать развитие перенапряжений при отключении больших индуктивностей. Рекомендуемая литература: [1, с. 401-409], [2, с. 436-439], [9, с. 320].

111. Каких значений достигают перенапряжения при отключении ненагруженных трансформаторов? Какими путями можно снизить амплитуду перенапряжений? Как влияет скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка выключателя на величину перенапряжений при отключении индуктивностей? Рекомендуемая литература: [1, с. 401-409], [2, с. 436-439], [9, с. 320].

112. Изложить условия возникновения резонансных перенапряжений в линейной и нелинейной колебательной цепи. Рекомендуемая литература: [1, с. 409-414], [2, с. 392-396], [9, с. 363].

113. Пояснить возникновение резонансных перенапряжений при несимметричном отключении фаз. Рекомендуемая литература: [1, с. 409-414], [2, с. 396-402], [9, с. 363].

114. Пояснить возникновение резонансных перенапряжений в дальних ЛЭП. Охарактеризовать влияние на эти перенапряжения длины линии, предвключенной индуктивности, потерь на корону, магнитного шунта трансформатора. Рекомендуемая литература: [1, с. 434-446], [2, с. 372-389], [9, с. 347-358].

115. Описать меры ограничения внутренних перенапряжений в дальних ЛЭП. Рекомендуемая литература: [1, с. 460-467], [2, с. 461-477].

116. Описать конструкцию и принцип работы комбинированного вентильного разрядника РВМК. Рекомендуемая литература: [2, с. 306], [9, с. 246-247].

ЗАДАЧА 1

Определить потери энергии на корону и среднегодовую мощность потерь для трехфазной линии переменного напряжения с горизонтальным расположением проводов. Рекомендуемая литература: [2, с. 46-61].

Методические указания к решению.

Для расчета использовать метод Левитова В.И. Относительная плотность воздуха δ принимается равной 0,95 для всех вариантов. Данные приведены в табл. 4.1.

$$P = 350 \cdot \omega \cdot \frac{C^2}{C_3 - C} \cdot U_K^2 \cdot F(U_\Phi / U_K),$$

где U_K - критическое напряжение короны фазы для каждого вида погоды, кВ.

$$U_K = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot n \cdot r_0 \cdot E_K}{K_y \cdot C},$$

где n - количество проводов в фазе;

K_y - коэффициент усиления

$$K_y = 1 + (n - 1) r_0 / r_p,$$

где r_0 - радиус одиночного провода, см.

r_p - радиус расщепления, см. Определяется по [2, табл. 3.1].

E_K - критическая напряженность, при которой на фазе зажигается коронный разряд, кВ/см.

E_K зависит от количества составляющих проводов в фазе и определяется

как
$$E_K = 23,3 \cdot m \cdot \delta \cdot \left[1 + \frac{0,62}{(r \cdot \delta)^{0,38}} \right],$$

где, для одиночного провода вместо r подставляется радиус одиночного провода r_0 ;

для расщепленных проводов вместо r подставляется эквивалентный радиус r_Σ ;

m - коэффициент гладкости провода.

Потери на корону, кВт/км-фаза, для каждого вида погоды определяются по формуле. Для хорошей погоды $m = 0,85$. Для тумана $m = 0,7$. Для инея, гололеда, изморози $m = 0,6$. Для дождя и мокрого снега m определяется по [2, рис. 3.10]. $F(U_\Phi / U_K)$ - функция, определяемая для каждого вида погоды по [2, рис. 3.11].

$$U_{\phi} = \frac{U_{НОМ} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad - \text{ амплитуда фазного напряжения линии, кВ.}$$

C - рабочая емкость той фазы, для которой определяются потери, Ф/км.

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{d}{r_{\Sigma}}},$$

где $\varepsilon \cdot \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-9}$ Ф/км - диэлектрическая проницаемость воздуха;

d - среднее геометрическое расстояние между фазами

$$d = \sqrt[3]{2a^3} \approx 1,26 \cdot a,$$

где a - расстояние между соседними фазами, м.

Таблица 4.1.

Наименование	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{НОМ}$, кВкВ	330	330	330	330	500	500	500	750	750	750
Число и марка проводов в фазе	2×АС-240	2×АС-300	2×АС-150	2×АС-400	2×АС-400	2×АС-500	2×АС-700	2×АС-400	2×АС-500	2×АС-700
r_0 , см	1,08	1,175	0,853	1,36	1,36	1,51	1,855	1,36	1,51	1,855
D_p , см	20	20	20	20	40	40	40	60	60	60
a , м	7,5	7,5	7,5	7,5	10,5	10,5	10,5	16,5	16,5	16,5
$h_{Х.П.}$, час.	7235	6580	3800	5100	7235	6580	3800	5100	7235	6580
h_T , час.	375	420	530	485	375	420	530	485	375	420
$h_{И.}$, час.	225	290	380	330	225	290	380	330	225	290
h_D , час.	400	670	2000	1045	425	770	2500	1245	350	620
h_{CH} , час.	525	800	2050	1800	500	700	1550	1600	575	850
J_D , мм/ч.	0,2	0,4	0,9	0,55	0,2	0,4	0,9	0,55	0,2	0,4
$3J_{CH}$, мм/ч	0,8	0,3	0,1	0,2	0,8	0,3	0,1	0,2	0,8	0,3

При горизонтальном расположении проводов емкость 1 и 3 фаз равны, а емкость средней фазы на 5 % больше.

r_{Σ} - эквивалентный радиус расщепленного провода, см. Определяется по [2, табл. 3.1].

C_{Σ} - эквивалентная емкость объемного заряда короны, Ф/км.

$$C_{\Sigma} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5 \cdot K \cdot C \cdot U_k / \delta \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega}}{r_{\Sigma}}},$$

где r_p - радиус расщепления, см. Определяется по табл. 4.2.

K - подвижность ионов.

Для тумана, дождя, мокрого снега, сухого снега $K = 1100 \text{ см}^2/\text{кВ}\cdot\text{с}$.

Для хорошей погоды, инея, гололеда, изморози $K = 2200 \text{ см}^2/\text{кВ}\cdot\text{с}$.

δ - относительная плотность воздуха;

ω - круговая частота.

Потери на корону на 1 км линии за 1 год A , кВт·час/км.

$$A = P_{х.п.} \cdot h_{х.п.} + P_T \cdot h_T + P_{и.и} \cdot h_{и.и} + P_D \cdot h_D + P_{сн} \cdot h_{сн}$$

Средняя за год мощность потерь на корону P_{CP} , кВт/км

$$P_{CP} = A/8760.$$

Таблица 4.2.

Характеристика провода			
Число проводов в фазе n	2	3	4
Эквивалентный радиус r_Σ	$\sqrt{r \cdot D_p}$	$\sqrt[3]{r \cdot D_p^2}$	$\sqrt[8]{2} \cdot \sqrt[4]{r \cdot D_p^3}$
Радиус расщепления r_p	$\frac{D_p}{2}$	$\frac{D_p}{\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{2}}{2} D_p$
$\kappa_y = \frac{E_{\max}}{E_{ср}}$	$1 + 2 \frac{r}{D_p}$	$1 + 2\sqrt{3} \frac{r}{D_p}$	$1 + 3\sqrt{2} \frac{r}{D_p}$

ЗАДАЧА 2

Рассчитать и построить кривую емкостного (начального) распределения напряжения (U_C) кривую максимальных потенциалов ($U_{\max}$) вдоль обмотки трансформатора в координатах $U_0, n/N$, при воздействии прямоугольной ($\tau_\Phi=0$) бесконечно длинной волны напряжения с амплитудой U_0 . Общее число элементов схемы замещения обмотки трансформатора - N , число элементов, где определяется величина U_C и $U_{\max}$ - n . Емкость одного элемента на землю - ΔC , собственная емкость каждого элемента вдоль обмотки трансформатора - ΔK . Значение $U_0, N, \Delta C, \Delta K$ и режим нейтрали трансформатора даны в таблице 4.3.

Методические указания к решению.

Использовать литературу [1, с. 164-173]; [4, с. 231-237].

1. Начальное распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора определится как

$$U_{C(n)} = U_0 \cdot e^{-\alpha N \cdot n / N},$$

где

$$\alpha N = N \sqrt{\frac{\Delta C}{\Delta K}};$$

$N = 10; \quad n = 0, 1, 2, \dots, 10.$

2. Максимальное напряжение в любой точке трансформатора определяется как

$$U_{\text{МАКС}}\left(\frac{n}{N}\right) = U_{\text{УСТ}}\left(\frac{n}{N}\right) + \left[\sum U_K\left(\frac{n}{N}\right) \right].$$

Амплитуда гармоник $U_{K \text{ МАКС}}$ при заземленной нейтрали трансформатора определяется по формуле

$$U_{K \text{ МАКС}} = \frac{2U_0}{K \cdot \pi \left[1 + \left(\frac{K \cdot \pi}{\alpha \cdot N} \right)^2 \right]},$$

где $K = 1, 2, 3.$

Амплитуды гармоник при изолированной нейтрали трансформатора определяются по формуле

$$U_{K \text{ МАКС}} = \frac{4U_0}{\pi(2k-2) \left\{ 1 + \left[\frac{\pi(2k-1)}{\alpha N} \right]^2 \right\}},$$

где $K = 1, 3, 5.$

3. Строим график, рассчитав амплитуду гармоник.

При построении кривой максимальных потенциалов в координатах $U_0, n/N$ для трансформатора с заземленной нейтралью строят 1, 2, 3 гармоники так, что в начале ($n/N = 0$) и в конце ($n/N = 1$) обмотки находятся их нулевые значения, т.е. на длине обмотки трансформатора укладывается целое число полуволн (полупериодов), равное номеру соответствующей гармоники. Для трансформатора с изолированной нейтралью строят 1, 3, 5 гармоники так, что в начале ($n/N = 0$) обмотки находятся их нулевые значения, а в конце обмотки ($n/N = 1$) находятся их максимальные значения, т.е. на длине обмотки трансформатора укладывается целое нечетное число четвертей периода, равное номеру соответствующей гармоники.

В каждой точке обмотки (n/N) суммируются ординаты всех гармоник, и затем эта сумма складывается (с обратным знаком) с $U_{уст}$ в данной точке обмотки.

Таблица 4.3

№ варианта	U_0 , %	N , шт	ΔC , пФ	ΔK , пФ	Режим нейтрали
1	100	30	225	2500	заземлена
2	100	30	275	1100	изолирована
3	100	10	275	1100	изолирована
4	100	20	275	1100	заземлена
5	100	10	540	1500	заземлена
6	100	30	168	1050	изолирована
7	100	10	980	2000	изолирована
8	100	20	980	2000	заземлена
9	100	20	168	1050	изолирована
10	100	10	168	1050	заземлена

ЗАДАЧА 3

Рассчитать и построить форму волны на шинах подстанции, схема замещения которой содержит последовательно соединенные индуктивность L и емкость C . Набегающая волна имеет косоугольный фронт t_ϕ и постоянную амплитуду U_0 . Значения L , C , t_ϕ , U_0 указаны в таблице 4.4. [2, с. 243-244].

Значения времени t задавать от 0 до $2T$ с шагом $1/8T$.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ мкс.}$$

Для значений времени $t \leq t_\phi$ расчет U_C вести по формуле

$$U_C = a \cdot t - \frac{a}{\omega} \sin \omega t,$$

где $a = \frac{U_0}{t_\phi}$.

Для значений $t \geq t_\phi$ расчет U_C вести по формуле

$$U_C = U_0 \left[1 - \frac{\sin \frac{\pi \cdot t_\phi}{T}}{\frac{\pi \cdot t_\phi}{T}} \cos \omega \left(t - \frac{t_\phi}{2} \right) \right].$$

Таблица 4.4

№ варианта	$L \cdot 10^{-6}, \text{ Гн}$	$C \cdot 10^{-6}, \text{ Ф}$	$t_{\Phi} \cdot 10^{-6}, \text{ с}$	$U_0, \text{ кВ}$
1	24	0,0095	1,5	450
2	10	0,01	1,5	300
3	20	0,02	1,0	450
4	11,5	0,02	3,0	750
5	5	0,02	0,5	250
6	30,5	0,03	4,5	450
7	10	0,04	2,0	700
8	16	0,04	2,5	250
9	8	0,05	3,0	450
10	15	0,06	1,5	600

ЗАДАЧА 4

Рассчитать удельное число отключений линии на железобетонных опорах. Коэффициент связи принять равным 0,25. Параметры линии приведены в табл. 4.6.

Методические указания к решению: использовать литературу [1, с. 332-333], [2, с. 323].

Удельное число отключений линии можно определить по формуле [1, с. 332]:

$$n = 0,18h(0,5V_{\text{ПЕР}1} \cdot \eta_1 + 0,5V_{\text{ПЕР}2} \cdot \eta_2 + V_{\alpha} \cdot V_{\text{ПЕР}3} \cdot \eta_1),$$

где h - средняя высота подвеса тросов, м.

$V_{\text{ПЕР}1}$ - вероятность перекрытия изоляции при ударе в опору.

$$V_{\text{ПЕР}1} = 10^{-\frac{I_3}{60}} = e^{-\frac{I_3}{26}},$$

где I_3 - защитный уровень линии с тросами при ударе молнии в опору, кА.

$$I_3 \cong \frac{U_{50\%}}{R + \delta \cdot h_{\text{оп}}},$$

где $U_{50\%}$ - минимальное импульсное разрядное напряжение фазовой изоляции линии, кВ. [1, табл. 11-1,]; [2, графики 6-8, 6-9]. Предварительно необходимо определить длину гирлянды изоляторов;

R - импульсное сопротивление заземления опоры, Ом;

$h_{\text{оп}}$ - высота опоры, м;

$\delta = 0,15$ для линии с двумя тросами;

$\delta = 0,30$ для линии с одним тросом.

η_1 - вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу при перекрытии на опоре;

η_2 - вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу при пробое в пролете промежутка трос-провод.

Определяются η_1 и η_2 с помощью таблицы 4.5.

Таблица 4.5

$E_{РАБ} = U_{РАБ}/l_{ПЕР}, \text{кВ}_{ДЕЙСТ.}/\text{м}$	50	30	20	10
η	0,6	0,45	0,25	0,1

$$U_{РАБ} = U_{НОМ}/\sqrt{3}, \quad l_{ПЕР} = l_{Г}, \quad l_{Г} = n \cdot H,$$

где H - строительная высота гирлянды в [1, табл. 10-2].

n - число изоляторов в гирлянде.

$V_{ПЕР2}$ - вероятность перекрытия изоляции трос-провод при ударе молнии в пролете.

$$V_{ПЕР2} = 10^{-\frac{a_{КР}}{36}} = e^{-\frac{a_{КР}}{15,7}},$$

где $a_{кр} \geq \frac{2250 \cdot S}{(1 - K_{\partial}) \cdot l}, \frac{\text{кА}}{\text{мкс}};$

S - расстояние между проводом и тросом, м;

l - длина пролета, м;

K_{∂} - коэффициент связи между тросом и проводом. $K_{\partial} = 0,25 - 0,3$.

$V_{ПЕР3}$ - вероятность перекрытия изоляции при прямом ударе молнии в провод

$$V_{ПЕР3} = 10^{-\frac{I_{3 \text{ ПР}}}{60}},$$

где $I_{3 \text{ ПР}}$ - защитный уровень линии при ударе молнии в провод.

$$I_{3 \text{ ПР}} = U_{50\%}/100, \text{ кА}.$$

V_{α} - вероятность прорыва молнии через тросовую защиту

$$\lg V_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{on}}}{90} - 4,$$

где α - защитный угол, град.

Таблица 4.6

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{НОМ}$ линии, кВ	110	110	110	220	220	220	330	330	500	500
Средняя высота	15	15	15	17	17	17	20	20	25	25

троса в пролете, м										
Защитный угол, град.	30	35	20	25	25	20	25	25	20	25
Сопротивление за- земления опоры, Ом	10	15	20	10	15	20	10	15	7	10
Длина пролета, м	200	200	200	250	350	350	400	400	450	500
Расстояние трос- провод в пролете, м	4	4	4	6	6	6	7	7	9	8
Число тросов	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1
Высота опоры, м	19	19	19	23	23	23	29	29	32	35

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1. Литература обязательная

1. Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевига.- М.: Энергия, 1964.- 471с.
2. Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевига.- М.: Энергия, 1976. - 488с.
3. Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко. - М.: Высшая школа, 1973.- 528с.
4. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. - М.: Энергия, 1968. - 463с.
5. Иерусалимов М.Е., Орлов Н.Н. Техника высоких напряжений. - Киев, Изд. университета, 1967. - 463с.
6. Стефанов К.С. Техника высоких напряжений. - Л.: Энергия, 1967.- 496с.
7. Важов В.Ф., Кузнецов Ю.И., Куртенков Г.Е. и др. Руководство к лабораторным работам по технике высоких напряжений. - Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 76с.
8. Байер М., Бек В. и др. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555с.
9. Ларионов В.П., Базуткин В.В., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. - Энергоатомиздат, 1986. - 464с.
10. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

5.2. Литература дополнительная

11. Куртенков Г.Е. Основы проектирования изоляции высоковольтного оборудования: Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 276с.
12. Леонтьев Ю.Н. Высоковольтные испытательные и электрофизические установки. Высоковольтные измерения. – Томск, ТПУ, 1993. – 93с.

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Рабочая программа, методические указания и контрольные задания

Составители: Нина Борисовна Вишневецкая
Юрий Иннокентьевич Кузнецов
Юрий Николаевич Леонтьев
Мария Тимофеевна Пичугина

Рецензент: И.И. Каляцкий, д.т.н., профессор каф. ТЭВН АЭЭФ

Подписано к печати
Формат 60х84/15. Бумага ксероксная.
Плоская печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч. - изд. л 1,47.
Тираж экз. Заказ . Цена свободная.
ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ № 1 от 18. 07. 94.
Типография ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина, 30.