

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра техники и электрофизики высоких напряжений

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН ФЭН

к.э.н. Чернов С. С.

“ ____ ” _____ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Техника высоких напряжений

Образовательная программа: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, профиль:
Электроэнергетика

Курс: 5, семестры : 10 9

Факультет энергетики, заочная форма обучения

		Семестр	
№	Вид деятельности	9	10
1	Всего зачетных единиц (кредитов)	0	5
2	Всего часов	0	180
3	Всего занятий в контактной форме, час.	2	36
4	Лекции, час.	2	8
5	Практические занятия, час.	0	6
6	Лабораторные занятия, час.	0	10
7	из них в активной и интерактивной форме, час.	18	0
8	Аттестация, час.	0	2
9	Консультации, час.		10
10	Самостоятельная работа, час.	0	142
11	Виды самостоятельной работы (курсовой проект, курсовая работа, РГЗ, подготовка к контрольной работе)		КР
12	Вид аттестации		Э

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению (специальности): 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

ФГОС введен в действие приказом №955 от 03.09.2015 г. , дата утверждения: 25.09.2015 г.

Место дисциплины в структуре учебного плана: Блок 1, вариативная

Рабочая программа разработана на основе компетентностной модели выпускника по направлению (специальности): 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

ТЭВН, протокол заседания кафедры № 9 от 20.06.2017

Утверждена на совете факультета энергетики, протокол № 9 от 21.06.2017

Программу разработал:

профессор, д.т.н. Качесов В. Е.

Заведующий кафедрой:

доцент, к.т.н. Лавров Ю. А.

Ответственный за образовательную программу:

доцент Лыкин А. В.

1. Внешние требования

Таблица 1.1

Компетенция ФГОС: ПК.5 готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности; в части следующих результатов обучения:
з11. знать основные характеристики оборудования электрических станций, подстанций и линий электропередачи
з4. знать особенности выбора изоляции оборудования высокого напряжения и линий электропередачи
у4. уметь проводить высоковольтные испытания изоляционных конструкций
у5. уметь выдвигать технические требования к характеристикам защитных аппаратов

2. Требования НГТУ к результатам освоения дисциплины

Таблица 2.1

Результаты изучения дисциплины по уровням освоения (иметь представление, знать, уметь, владеть)	Формы организации занятий
<i>Техника высоких напряжений</i>	
ПК.5.з4 знать особенности выбора изоляции оборудования высокого напряжения и линий электропередачи	
1.з4. знать особенности выбора изоляции оборудования высокого напряжения и линий электропередачи	Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
ПК.5.з11 знать основные характеристики оборудования электрических станций, подстанций и линий электропередачи	
2.з11. знать основные характеристики оборудования электрических станций, подстанций и линий электропередачи	Лекции; Самостоятельная работа
ПК.5.у4 уметь проводить высоковольтные испытания изоляционных конструкций	
3.у4. уметь проводить высоковольтные испытания изоляционных конструкций	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
ПК.5.у5 уметь выдвигать технические требования к характеристикам защитных аппаратов	
4.у5. уметь выдвигать технические требования к характеристикам защитных аппаратов	Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа

3. Содержание и структура учебной дисциплины

Таблица 3.1

Темы лекций	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 9				
Дидактическая единица: Перенапряжения в электрических сетях и координация изоляции.				
1. Основные характеристики перенапряжений и изоляции. Введение в курсовое проектирование.	18	2	1, 4	Лекция
Семестр: 10				
Дидактическая единица: Квазистационарные перенапряжения				
17. Емкостный эффект в длинных линиях электропередачи. Квазистационарные перенапряжения на линии и оборудовании линейных ячеек.	0	2	1, 4	Лекция
Дидактическая единица: Коммутационные перенапряжения				

18. Коммутационные перенапряжения. Инженерная формула для оценки коммутационных перенапряжений.	0	2	1, 4	Лекция
Дидактическая единица: Грозовые перенапряжения				
19. Грозозащита объектов от прямых ударов молнии.	0	2	1, 4	Лекция
Дидактическая единица: Изоляция основного электротехнического оборудования ее испытания				
20. Изоляция трансформаторов и перенапряжения в трансформаторах при набегании волн атмосферного происхождения.	0	1	1, 3, 4	Лекция
Дидактическая единица: Способы и средства защиты от перенапряжений				
21. Способы и средства снижения перенапряжений. Основные характеристики защитных аппаратов.	0	1	1, 2, 4	Лекция

Таблица 3.2

Темы лабораторных работ	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 10				
Дидактическая единица: Квазистационарные перенапряжения				
14. Однофазные замыкания в распределительных сетях. Дуговые перенапряжения.	0	4	1, 4	Лабораторная работа
Дидактическая единица: Коммутационные перенапряжения				
13. Распределение напряжения по гирлянде подвесных изоляторов.	0	2	1, 4	Лабораторная работа
Дидактическая единица: Грозовые перенапряжения				
15. Перенапряжения грозового происхождения в трансформаторах.	0	2	1, 3, 4	Лабораторная работа
Дидактическая единица: Изоляция основного электротехнического оборудования ее испытания				
16. Испытания подвесной линейной изоляции	0	2	1, 3, 4	Лабораторная работа

Таблица 3.3

Темы практических занятий	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 10				
Дидактическая единица: Квазистационарные перенапряжения				
8. Расчет токов однофазного замыкания на землю и квазистационарных перенапряжений на нейтрали распределительной сети.	0	2	1, 4	Практика
Дидактическая единица: Коммутационные перенапряжения				

9. Приближенный расчет коммутационных перенапряжений при ТАПВ линий высокого и сверхвысокого напряжения.	0	2	1, 4	Практика
Дидактическая единица: Способы и средства защиты от перенапряжений				
10. Приближенный расчет энерговыделения в ограничителях перенапряжения при ограничении кратковременных перенапряжений.	0	2	1, 4	Практика

Таблица 3.4

Темы для самостоятельного изучения	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 10				
Дидактическая единица: Квазистационарные перенапряжения				
1. Уровни испытанных напряжений основного электротехнического оборудования	0	25	1, 2, 4	Самостоятельная подготовка
Дидактическая единица: Перенапряжения в электрических сетях и координация изоляции.				
4. Характеристики перенапряжений	0	25	1, 2, 4	Самостоятельная работа.
Дидактическая единица: Коммутационные перенапряжения				
2. Основные характеристики ОПН и вентильных разрядников.	0	40	1, 2, 4	Самостоятельная работа
Дидактическая единица: Изоляция основного электротехнического оборудования ее испытания				
3. Основные характеристики внутренней и внешней изоляции.	0	42	1, 2, 4	Самостоятельная работа.

4. Самостоятельная работа обучающегося

№	Виды самостоятельной работы	Ссылки на результаты обучения	Часы на выполнение	Часы на консультации
Семестр: 9				
1	Подготовка к аттестации	1, 3, 4	0	0
: Изоляция и перенапряжения : методические указания к лабораторным работам для 4 курса факультета энергетики (бакалаврская подготовка по направлению 140200 "Электроэнергетика") / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост. А. А. Клейн [и др.]. - Новосибирск, 2006. - 105, [1] с.				
Семестр: 10				
1	Техника высоких напряжений	1, 4	10	10
Выбор изоляции воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения на основе анализа квазистационарных, коммутационных и грозовых перенапряжений.: Техника высоких напряжений : методические указания к курсовой работе для 4 курса заочного отделения ФЭН (бакалаврская подготовка по направлению "Электроэнергетика") / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост. В. Е. Качесов]. - Новосибирск, 2015. - 35, [1] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000219976				
2	Самостоятельное изучение теоретического материала	1, 2, 4	132	0

Студент изучает темы, приведенные в таблице 3.4 : Изоляция и перенапряжения : методические указания к лабораторным работам для 4 курса факультета энергетики (бакалаврская подготовка по направлению 140200 "Электроэнергетика") / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост. А. А. Клейн [и др.]. - Новосибирск, 2006. - 105, [1] с.

5. Технология обучения

Для организации и контроля самостоятельной работы обучающихся, а также проведения консультаций применяются информационно-коммуникационные технологии (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Деятельность	Информационно-коммуникационные технологии
Информирование	Портал НГТУ
Консультирование	e-mail
Контроль	e-mail
Размещение учебных материалов	ЭБС

6. Правила аттестации обучающихся по учебной дисциплине

Для аттестации обучающихся по дисциплине используется балльно-рейтинговая система (БРС), позволяющая выставять оценки по традиционной шкале и 15-уровневой ECTS. Краткая информация о БРС приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Оцениваемые виды деятельности обучающихся	Максимальный балл
Семестр: 9	
<i>Курсовая работа: Итого</i>	
Семестр: 10	
<i>Лекция:</i>	10
<i>Лабораторная:</i>	40
<i>Практические занятия:</i>	10
<i>Курсовая работа: Итого</i>	100
Контролирующие материалы приводятся в "Техника высоких напряжений : методические указания к курсовой работе для 4 курса заочного отделения ФЭН (бакалаврская подготовка по направлению "Электроэнергетика") / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост. В. Е. Качесов]. - Новосибирск, 2015. - 35, [1] с. : ил., табл. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000219976 "	
<i>Экзамен:</i>	40

В таблице 6.2 представлено соответствие форм контроля заявляемым требованиям к результатам освоения дисциплины.

Таблица 6.2

Коды компетенций ФГОС	Результаты обучения	Формы контроля	
		Защита КР/КР	Экзамен
ПК.5	311. знать основные характеристики оборудования электрических станций, подстанций и линий электропередачи	+	+
	34. знать особенности выбора изоляции оборудования высокого напряжения и линий электропередачи	+	+
	у4. уметь проводить высоковольтные испытания изоляционных конструкций		+

	у5. уметь выдвигать технические требования к характеристикам защитных аппаратов	+	+
--	---	---	---

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в приложении № 1 к рабочей программе.

7. Литература

Основная литература

1. Куффель Е. Техника и электрофизика высоких напряжений : [учебно-справочное руководство] / Е. Куффель, В. Цаенгль, Дж. Куффель ; пер. с англ. С. М. Смольского ; под ред. И. П. Кужекина. - Долгопрудный, 2011. - 517, [2] с. : ил., табл.
2. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>
3. Чайкина Л. П. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / Л.П. Чайкина. — Электрон. текстовые данные. — М. : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, Маршрут, 2005. — 230 с. — 5-89035-298-9. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16239.html>
4. Титков В.В. Физические основы техники высоких напряжений, сильных магнитных полей и токов [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2011. — 185 с. — 978-5-7422-3487-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43983.html>

Интернет-ресурсы

1. ЭБС НГТУ : <http://elibrary.nstu.ru/>
2. ЭБС «Издательство Лань» : <https://e.lanbook.com/>
3. ЭБС IPRbooks : <http://www.iprbookshop.ru/>
4. ЭБС "Znaniy.com" : <http://znaniy.com/>
5. :

8. Методическое и программное обеспечение

8.1 Методическое обеспечение

1. Изоляция и перенапряжения : методические указания к лабораторным работам для 4 курса факультета энергетики (бакалаврская подготовка по направлению 140200 "Электроэнергетика") / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост. А. А. Клейн [и др.]. - Новосибирск, 2006. - 105, [1] с.
2. Техника высоких напряжений : методические указания к курсовой работе для 4 курса заочного отделения ФЭН (бакалаврская подготовка по направлению "Электроэнергетика") / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост. В. Е. Качесов]. - Новосибирск, 2015. - 35, [1] с. : ил., табл. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000219976

8.2 Специализированное программное обеспечение

- 1 Windows
- 2 Office

9. Материально-техническое обеспечение

Презентационное оборудование

№	Наименование	Назначение
1	Презентационное оборудование (мультимедиа-проектор, экран, компьютер для управления)	Лабораторные установки в высоковольтном зале

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра техники и электрофизики высоких напряжений

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН ФЭН
к.э.н., доцент С.С. Чернов
“ ” _____ Г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Техника высоких напряжений

Образовательная программа: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, профиль:
Электроэнергетика

Тема	Код формируемой компетенции	Знания/умения	Контролирующее мероприятие
Требования к изоляции. Вольт-секундные характеристики изоляции. Координация уровней изоляции с кратностью воздействующих перенапряжений и параметрами защитных аппаратов. Назначение и конструкция изоляции ВЛ и подстанций: штыревые, подвесные, опорные и проходные изоляторы. Выбор количества изоляторов в гирлянде и габаритов воздушных промежутков. Регулирование электрического поля во внешней изоляции.	ПК.5/ПТ	з1. знать особенности выбора изоляции оборудования высокого напряжения и линий электропередачи	Курсовой проект, вопросы 1-8 Экзамен, вопросы 1-11
Исследование распределения напряжения по изоляторам гирлянды		з8. знать основные характеристики	Курсовой проект, вопросы 1-8
Расчет распределения напряжения по изоляторам гирлянды		з8. знать основные характеристики оборудования электрических станций, подстанций и линий электропередачи	Экзамен, вопросы 25-26
Испытание высоким напряжением, профилактические испытания (измерение тангенса дельта, сопротивления, емкости изоляции,		у3. уметь проводить высоковольтные	Экзамен, вопросы 34-40
Исследование характеристик защитных аппаратов		у4. уметь выдвигать технические требования к характеристикам защитных аппаратов	Курсовой проект, вопросы 1-8 Экзамен, вопросы 11-13

Форма экзаменационного билета

Дисциплина Техника высоких напряжений
(наименование дисциплины)

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

- 1 Классификация перенапряжений в электрических системах.
- 2 Измерение высокого напряжения с помощью делителей напряжения.
- 3 Задача. Определить, требуется ли компенсация емкостного тока замыкания на землю в воздушно-кабельной сети 10 кВ. Суммарная протяженность ВЛ – 100 км, КЛ – 10 км.
 $C_{\phi \text{ ВЛ}} = 4 \text{ нФ/км}$, $C_{\phi \text{ КЛ}} = 0,2 \text{ мкФ/км}$.

Составитель _____ Н.Ф.Петрова

Заведующий кафедрой _____ Ю.А.Лавров

« ____ » _____ 20 ____ г.

Критерии оценки

Ответ засчитывается на **пороговом** уровне, если студент дает определение основных понятий, называет базовые нормативные документы, владеет элементарными знаниями в области электроэнергетики, оценка составляет 10 баллов.

Ответ засчитывается на **базовом** уровне, если студент формулирует основные гипотезы, законы, дает характеристику процессов и явлений, сопровождающих возникновение перенапряжений, проводит анализ причин возникновения перенапряжений, оценка составляет 30 баллов.

Ответ засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент проводит комплексный анализ причин аварийности электрооборудования, выявляет проблемы борьбы с перенапряжениями и предлагает механизмы их решения, оценка составляет 60 баллов.

Экзамен считается сданным, если сумма баллов по всем вопросам составляет не менее 25 баллов (из 60 возможных). Сумма баллов в общей оценке по дисциплине, определяется Правилами аттестации.

Экзаменационные вопросы

1. Классификация перенапряжений в электрических системах.
2. Грозовая деятельность. Основные параметры молнии.
3. Стержневые молниеотводы. Их зоны защиты.
4. Тросовые молниеотводы. Их зоны защиты.
5. Грозоупорность ВЛ на металлических и ж/б опорах.
6. Грозоупорность ВЛ на деревянных опорах.
7. Грозоупорность вращающихся машин.
8. Методика оценки грозоупорности подстанций от волн, набегających с ВЛ.
9. Меры защиты изоляции трансформаторов от волн атмосферного происхождения.
10. Заземления в электроустановках. Стационарное и импульсное сопротивление заземления. Конструкции заземлителей.
11. Трубчатые разрядники.
12. Вентильные разрядники.
13. Нелинейные ограничители перенапряжений. Основные критерии выбора ОПН в сетях различных классов напряжения.
14. Сеть с изолированной нейтралью. Смещение нейтрали в нормальном режиме и в режиме однофазного замыкания на землю.
15. Сеть с компенсацией тока замыкания на землю. Резонансное смещение нейтрали.
16. Сеть с резистивным заземлением нейтрали. Отключаемые и неотключаемые резисторы.
17. Дуговые перенапряжения в сетях с 6...35 кВ. Различные гипотезы горения и гашения дуги. Меры борьбы с дуговыми замыканиями на землю.
18. Феррорезонанс в сетях 6...35 кВ и меры борьбы с ним.
19. Классификация перенапряжений в сетях с эффективным заземлением нейтрали.
20. Квазистационарные перенапряжения в сетях с глухим заземлением нейтрали.
21. Коммутационные перенапряжения в сетях с эффективным заземлением нейтрали.
22. Перенапряжения при отключении малых индуктивных токов.
23. Перенапряжения при отключении емкостных токов.
24. Сравнение различных способов заземления нейтрали.
25. Изоляция ВЛ. Выбор изоляции ВЛ.
26. Изоляция подстанций. Аппаратные изоляторы.
27. Основные виды внутренней изоляции.
28. Изоляция силовых кабелей.
29. Изоляция силовых трансформаторов. Главная и продольная изоляция.
30. Изоляция вращающихся машин.
31. Выравнивание электрических полей в наружной изоляции.
32. Выравнивание электрических полей во внутренней изоляции.
33. Конструкции проходных изоляторов.
34. Назначение и классификация методов испытания изоляции.
35. Испытания изоляции высоким напряжением.
36. Измерения основных характеристик изоляции.
37. Получение высокого переменного напряжения в испытательных лабораториях.
38. Получение высокого импульсного напряжения.
39. Измерение высокого напряжения с помощью шаровых разрядников.
40. Измерение высокого напряжения с помощью делителей напряжения.

Комплект заданий для дифференциального зачета по курсовому проекту

Дисциплина Техника высоких напряжений
(наименование дисциплины)

- Вопрос 1. От каких факторов зависят первичные и волновые параметры воздушной линии (ВЛ).
- Вопрос 2. От каких факторов зависит количество изоляторов в гирлянде ВЛ
- Вопрос 3. Оценить значение вынужденной составляющей на разомкнутом конце ВЛ.
- Вопрос 4. Какими техническими мероприятиями можно снизить количество отключений ВЛ при грозовых воздействиях.
- Вопрос 5. Какими техническими мероприятиями можно снизить вынужденную составляющую напряжения.
- Вопрос 6. Какими техническими мероприятиями можно снизить перенапряжения при коммутации ВЛ в цикле АПВ.
- Вопрос 7. Как зависит напряжение на ВЛ от места установки шунтирующего реактора?
- Вопрос 8. Как зависит напряжение на ВЛ от мощности шунтирующего реактора?

Критерии оценки

Ответ засчитывается на **пороговом** уровне, если студент дает определение основных понятий, называет базовые нормативные документы, владеет элементарными знаниями в области электроэнергетики, оценка составляет 10 баллов.

Ответ засчитывается на **базовом** уровне, если студент формулирует основные гипотезы, законы, дает характеристику процессов и явлений, сопровождающих возникновение перенапряжений, проводит анализ причин возникновения перенапряжений, оценка составляет 30 баллов.

Ответ засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент проводит комплексный анализ причин аварийности электрооборудования, выявляет проблемы борьбы с перенапряжениями и предлагает механизмы их решения, оценка составляет 60 баллов.

За правильный ответ на каждый вопрос студент получает максимум 10 баллов. Курсовой проект считается сданным, если сумма баллов по всем вопросам составляет не менее 30 баллов (из 60 возможных). Сумма баллов в общей оценке по дисциплине, определяется Правилами аттестации.

Задание на курсовой проект по дисциплине
«Техника высоких напряжений» на тему:
«Выбор изоляции ВЛ»

1. При заданном типе опоры и класса напряжения выбор изолирующей подвески по условию надежной эксплуатации ВЛ в нормальном режиме.
2. Выбор мощности шунтирующих реакторов, исходя из допустимого уровня напряжения на ВЛ в минимальном режиме эксплуатации и в режиме синхронизации электропередачи
3. Выработка рекомендаций по способу синхронизации ЛЭП, исходя из допустимого уровня напряжения на ВЛ
4. Определение количества отключений ВЛ при грозовых поражениях и формулировка рекомендаций по защите ВЛ от грозовых перенапряжений.
5. Определение статистических характеристик перенапряжений, возникающих при повторном включении аварийной фазы и вероятности перекрытия изоляции при осуществлении этой коммутации.
6. Выбор системы мер защиты от коммутационных перенапряжений, исходя из требуемого уровня надежности эксплуатации линейной изоляции ВЛ.
7. Написание пояснительной записки к работе, содержащей все её пункты с четкими выводами по работе в целом.

Образец тестовых заданий при выполнении контрольной работы

Дисциплина Техника высоких напряжений
(наименование дисциплины)

1. Из каких условий выбирается длина гирлянды для ВЛ 110 кВ и выше? (выбрать правильный(е) ответ(ы))

- 1) надежной работы изоляции при воздействии грозовых перенапряжений,
- 2) надежной работы изоляции при воздействии коммутационных перенапряжений,
- 3) надежной работы изоляции при воздействии рабочего напряжения.

Ответы: _____

2. Чем определяется ток гашения в вентильном разряднике? (выбрать правильный(е) ответ(ы))

- 1) способом заземления нейтрали сети,
- 2) конструкцией искровых промежутков,
- 3) величиной тока короткого замыкания в сети,
- 4) амплитудой волны, набегающей на разрядник.

Ответы: _____

3. При определении потерь энергии на корону на линиях электропередачи учитывают (выбрать правильный(е) ответ(ы))

- 1) местную корону;
- 2) общую корону;
- 3) импульсную корону.

Ответы: _____

4. Чему равен ток однофазного замыкания на землю в сети 35 кВ, состоящей из КЛ протяженностью 25 км ($C_{\phi} = 100$ нФ/км)?

Ответ: _____

5. Какие преимущества и недостатки имеют ОПН по сравнению с РВ ?

Преимущества: _____

Недостатки: _____

Критерии оценки

Ответ засчитывается на **пороговом** уровне, если студент дает определение основных понятий, называет базовые нормативные документы, владеет элементарными знаниями в области электроэнергетики, оценка составляет 10 баллов.

Ответ засчитывается на **базовом** уровне, если студент формулирует основные гипотезы, законы, дает характеристику процессов и явлений, сопровождающих возникновение перенапряжений, проводит анализ причин возникновения перенапряжений, оценка составляет 30 баллов.

Ответ засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент проводит комплексный анализ причин аварийности электрооборудования, выявляет проблемы борьбы с перенапряжениями и предлагает механизмы их решения, оценка составляет 60 баллов.

За выполнение каждого задания в контрольной работе студент получает максимум по 3 балла. Итого за выполнение контрольной работы начисляется максимум 15 баллов. Коэффициент, с которым учитывается полученная сумма баллов в общей оценке по дисциплине, равен 1.

Паспорт экзамена

по дисциплине «Техника высоких напряжений», 8 семестр

1. Методика оценки

Экзамен проводится в (письменной форме по тестам.

Пример теста для экзамена

Вопрос 1. Из каких условий выбирается длина гирлянды для ВЛ 110 кВ и выше?

Ответы:

- 1) надежной работы изоляции при воздействии грозовых перенапряжений,
- 2) надежной работы изоляции при воздействии коммутационных перенапряжений,
- 3) надежной работы изоляции при воздействии рабочего напряжения.

Вопрос 2. Чем определяется ток гашения в вентильном разряднике?

Ответы:

- 1) способом заземления нейтрали сети,
- 2) конструкцией искровых промежутков,
- 3) величиной тока короткого замыкания в сети,
- 4) амплитудой волны, набегающей на разрядник.

2. Критерии оценки

- Ответ на экзаменационный тест считается **неудовлетворительным**, если набрано менее 20 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **пороговом** уровне, если набрано от 21 до 25 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **базовом** уровне, если набрано от 26 до 33 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **продвинутом** уровне, если набрано от 34 до 40 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Список вопросов для подготовки к экзаменационному тесту

1. Классификация перенапряжений в электрических системах.
2. Грозовая деятельность. Основные параметры молнии.
3. Стержневые молниеотводы. Их зоны защиты.
4. Тросовые молниеотводы. Их зоны защиты.
5. Грозоупорность ВЛ на металлических и ж/б опорах.
6. Грозоупорность ВЛ на деревянных опорах.
7. Грозоупорность вращающихся машин.
8. Методика оценки грозоупорности подстанций от волн, набегающих с ВЛ.
9. Меры защиты изоляции трансформаторов от волн атмосферного происхождения.
10. Заземления в электроустановках. Стационарное и импульсное сопротивления заземления. Конструкции заземлителей.
11. Трубчатые разрядники.
12. Вентильные разрядники.
13. Нелинейные ограничители перенапряжений. Основные критерии выбора ОПН в сетях различных классов напряжения.
14. Сеть с изолированной нейтралью. Смещение нейтрали в нормальном режиме и в режиме однофазного замыкания на землю.
15. Сеть с компенсацией тока замыкания на землю. Резонансное смещение нейтрали.
16. Сеть с резистивным заземлением нейтрали. Отключаемые и неотключаемые резисторы.
17. Дуговые перенапряжения в сетях с 6...35 кВ. Различные гипотезы горения и гашения дуги. Меры борьбы с дуговыми замыканиями на землю.
18. Феррорезонанс в сетях 6...35 кВ и меры борьбы с ним.
19. Классификация перенапряжений в сетях с эффективным заземлением нейтрали.
20. Квазистационарные перенапряжения в сетях с глухим заземлением нейтрали.
21. Коммутационные перенапряжения в сетях с эффективным заземлением нейтрали.
22. Перенапряжения при отключении малых индуктивных токов.
23. Перенапряжения при отключении емкостных токов.
24. Сравнение различных способов заземления нейтрали.
25. Изоляция ВЛ. Выбор изоляции ВЛ.
26. Изоляция подстанций. Аппаратные изоляторы.
27. Основные виды внутренней изоляции.
28. Изоляция силовых кабелей.
29. Изоляция силовых трансформаторов. Главная и продольная изоляция.
30. Изоляция вращающихся машин.
31. Выравнивание электрических полей в наружной изоляции.
32. Выравнивание электрических полей во внутренней изоляции.
33. Конструкции проходных изоляторов.
34. Назначение и классификация методов испытания изоляции.
35. Испытания изоляции высоким напряжением.
36. Измерения основных характеристик изоляции.
37. Получение высокого переменного напряжения в испытательных лабораториях.
38. Получение высокого импульсного напряжения.
39. Измерение высокого напряжения с помощью шаровых разрядников.
40. Измерение высокого напряжения с помощью делителей напряжения.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

621.3

№

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Методическое указание
к курсовой работе для студентов IV курса
факультета энергетики
(бакалаврская подготовка по направлению 13.03.02
"Электроэнергетика и электротехника")

НОВОСИБИРСК
2015

Составители: канд. техн. наук, доцент Н.В.Цуркан,
канд. техн. наук, доцент Н.В.Щеглов.

Рецензент: канд. техн. наук, доцент Ю.А.Лавров

Работа подготовлена кафедрой техники
и электрофизики высоких напряжений

Оглавление

Стр.

Введение.....	4
1. Выбор изоляции воздушных линий электропередачи.....	
1.1. Разрядные напряжения воздушных промежутков, характерных для линий электропередачи.....	
1.2. Линейные изоляторы.....	
1.3. Разрядные напряжения гирлянд изоляторов.....	
1.4. Изолирующая подвеска проводов.....	
1.5. Выбор изоляции линий по нормативным документам.....	
2. Определение параметров расчетной схемы.....	
2.1. Определение параметров воздушной линии электропередачи.....	
2.2. Определение параметров примыкающих систем.....	
3. Грозоупорность воздушных линий электропередачи.....	
3.1. Определение числа отключений ВЛ при ударах молнии в провода.....	
3.2. Определение числа отключений при ударе молнии в опору.....	
3.3. Определение числа отключений при обратных перекрытиях с троса на провод.....	
4. Расчет коммутационных перенапряжений при повторном включении линии в цикле АПВ.....	
4.1. Расчет установившихся режимов односторонне включенной ВЛ.....	
4.2. Определение закона распределения максимальных перенапряжений при включении ВЛ и выбор мер ограничения перенапряжений.....	
4.3. Определение вероятности перекрытия изоляции ВЛ при включении в цикле АПВ.....	
5. Определение показателя надежности изоляции ВЛ.....	

Введение

Изоляция высоковольтных линий электропередачи в процессе эксплуатации подвергается как длительному воздействию рабочего напряжения, так и кратковременному воздействию грозовых и коммутационных перенапряжений. Задачей данной курсовой работы является выбор изоляции воздушных линий электропередачи с глухозаземленной нейтралью путем анализа всех видов электрических воздействий, а так же выбор системы мер защиты от перенапряжений, отвечающих допустимому значению отключений ВЛ в год.

В состав работы входят следующие разделы:

1. Выбор изоляции воздушных линий электропередачи заданного класса напряжения при заданном типе опор.
2. Расчет параметров ВЛ с выбранными изоляционными промежутками и расчет параметров примыкающих систем.
3. Расчет грозоупорности рассматриваемой линии электропередачи.
4. Анализ установившихся режимов односторонне включенной ВЛ, возникающих в режиме синхронизации и при включении в цикле АПВ. Разработка рекомендаций по обеспечению требуемого уровня напряжений в этих режимах.
5. Расчет коммутационных перенапряжений при повторном включении линии в цикле АПВ. Выбор мер ограничения перенапряжений.
6. Определение вероятности перекрытия изоляции ВЛ при включении в цикле АПВ.
7. Определение показателя надежности изоляции ВЛ.
8. Написание пояснительной записки к курсовой работе, отражающей все ее разделы и содержащей выводы по работе в целом.
9. Построение чертежа опоры и изолирующей подвески проводов и тросов в формате А3.

1. Выбор изоляции воздушных линий электропередачи

1.1. Разрядные напряжения воздушных промежутков, характерных для линий электропередачи

Провода ВЛ прикрепляются при помощи изоляторов и арматуры к опорам или кронштейнам и стойкам на инженерных конструкциях. Опоры ВЛ выполняются в основном металлическими или железобетонными, в некоторых случаях деревянными.

Основной изоляцией ВЛ служит атмосферный воздух, т.к. воздушная изоляция имеет ряд достоинств, благодаря которым ВЛ широко применяют для передачи электрической энергии:

- простота конструкции и малая, по сравнению с другими способами передачи электроэнергии, стоимость линии;
- отсутствие старения, т.е. изменения электрических характеристик при длительной эксплуатации;
- способность восстанавливать свои изолирующие свойства после погасания разряда.

Наиболее характерными промежутками ВЛ являются следующие воздушные промежутки:

- между проводом и землей;
- между соседними проводами;
- между проводом и транспортом, который может проезжать под проводами линии электропередачи;
- промежуток между проводом и грозозащитным тросом, применяемым для защиты проводов ВЛ от прямых попаданий молнии.

Изоляция проводов на опоре складывается из гирлянд изоляторов и воздушных промежутков, основными из которых являются промежутки между проводом и стойкой или стойками опоры, между проводом и траверсой, между проводом и оттяжкой.

Разрядные напряжения воздушных промежутков зависят от их длины, формы электродов, метеорологических условий, длительности воздействия и скорости нарастания напряжения.

Воздушные промежутки между проводом и стойкой опоры

Зависимости разрядного напряжения воздушного промежутка “провод – стойка опоры” при воздействии напряжения промышленной частоты, колебательного коммутационного и грозового импульсов напряжения от длины промежутка приведены на рис.1.1.

Средние провода на опорах типа “рюмка” или близкой ей конструкции находятся между металлоконструкциями, что приводит к увеличению неравномерности электрического поля и, как следствие, к снижению 50%-ного

разрядного напряжения промежутка ($U_{p0,5}$) между проводом и металлоконструкцией по сравнению с $U_{p0,5}$ промежутка "провод - стойка опоры" для крайних фаз. Однако, одновременно уменьшается разброс разрядных напряжений (σ) и поэтому минимальное разрядное напряжение ($U_{p0,5} - 3\sigma$) практически не зависит ни от формы провода, ни от конструкции опоры. Разрядные напряжения промежутка "провод – стойка в окне опоры" также приведены на рис.1.1.

Воздушные промежутки между проводами, между проводом и землей или транспортом

Разрядные напряжения воздушных промежутков зависят от длины промежутка, длительности воздействующего напряжения, наличия под проводами негабаритных транспортных средств, конфигурации фазы и напряжения на соседних фазах. На рис.1.2 приведены зависимости разрядных напряжений от длины воздушного промежутка "провод - земля". С увеличением высоты провода над землей влияние наличия под проводом негабаритного транспорта на 50%-ное разрядное напряжение воздушного промежутка "провод - земля" уменьшается (1), а при высоте 12 м это влияние практически отсутствует, так как характер электрического поля в промежутке в этом случае в основном определяется расстоянием от провода до земли.

1.2. Линейные изоляторы

В последние годы в России нашли применение изоляторы из закаленного стекла, которые по механическим и электрическим характеристикам не уступают, а в некоторых случаях превосходят фарфоровые. Стекланные изоляторы более удобны в эксплуатации: пробой фарфоровых изоляторов визуально определить нельзя, а при пробое изолятора из закаленного стекла происходит видимое разрушение тарелки, причем механические характеристики изоляторов изменяются незначительно. При перекрытии гирлянды с разрушенной тарелкой стеклнного изолятора разряд развивается снаружи изолятора и, как правило, не приводит к потере его механической прочности. Кроме того, разрушенный изолятор можно выявить с земли или с вертолета при облете ВЛ.

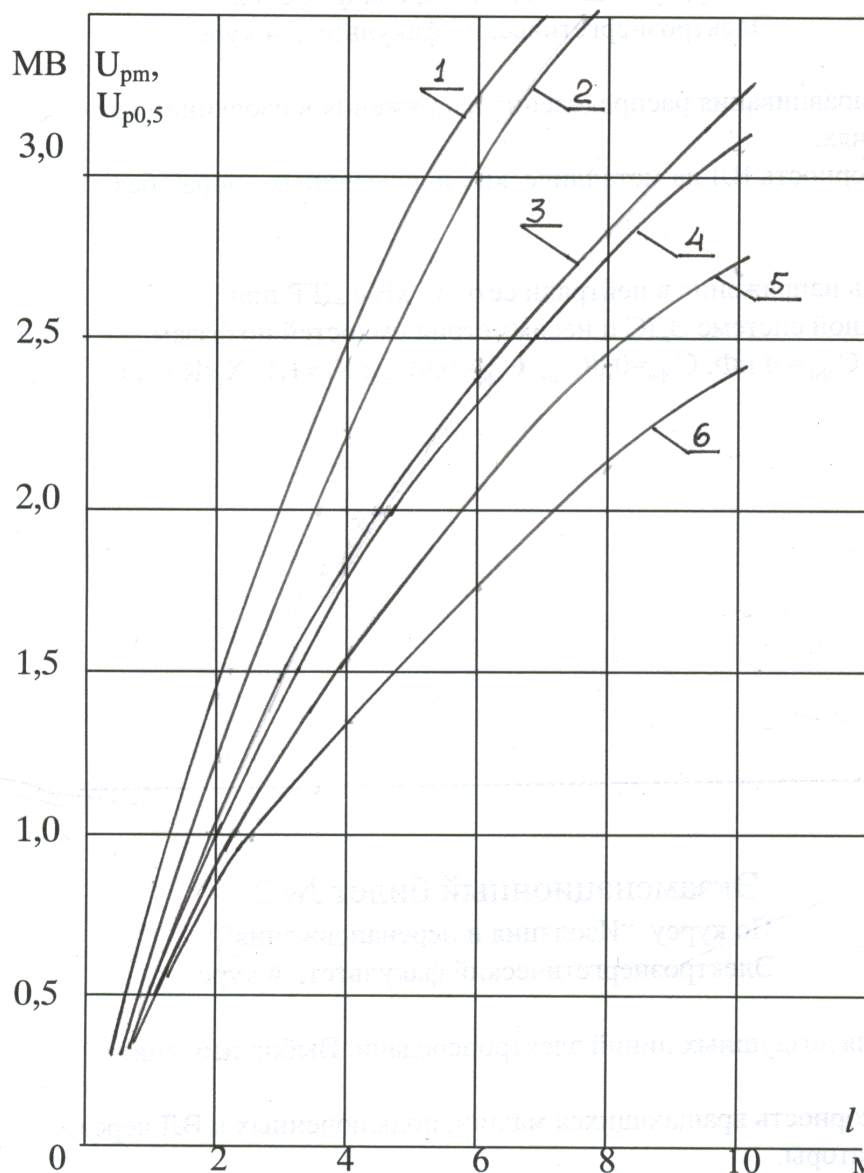


Рис.1.1. Зависимость средних разрядных (3), 50% - ных разрядных (1,2,4,5) и выдерживаемых $U_{p0,5} - 3\sigma$ (6) напряжений воздушных промежутков от их длины: 1-4 - промежуток “провод – стойка”; 5 – промежуток “провод - стойка в окне опоры”; 1, 2 – грозовой импульс; 3 – напряжение промышленной частоты (амплитудные значения); 4, 5 – коммутационные импульсы с $T_n = 3000 \div 5000 \text{ мкс}$; 1 – отрицательная полярность; 2, 4, 5, 6 – положительная полярность.

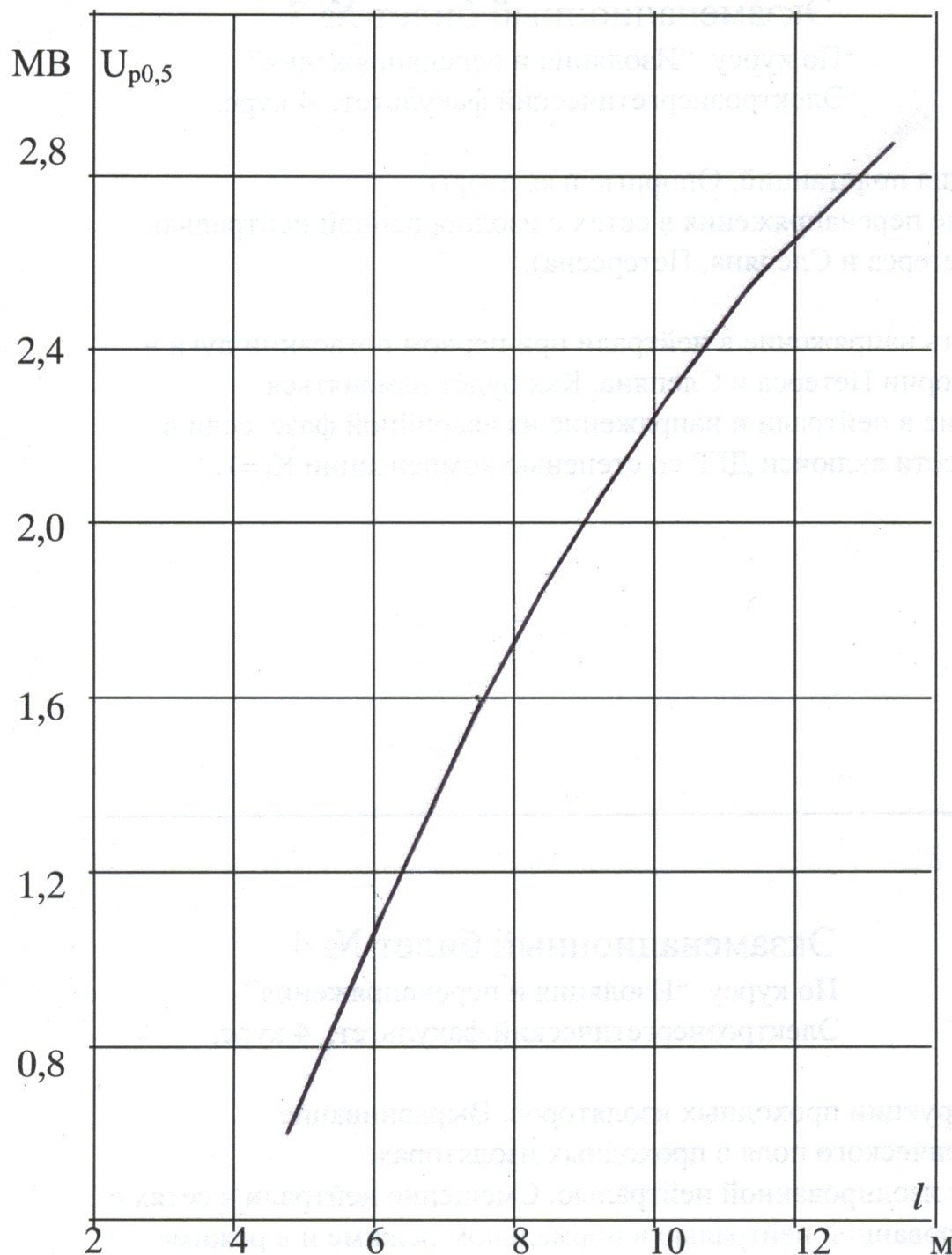


Рис.1.2. Зависимость 50%-ных разрядных напряжений воздушных промежутков между проводом (в середине пролета) и землей при наличии под проводом транспорта высотой 4м, длиной 8м и шириной 3,5м

В процессе эксплуатации изолятор подвергается одновременному воздействию механических, электрических, химических и других видов нагрузок. Экономически невыгодно создавать изолятор, который мог бы надежно работать при всех возможных максимальных нагрузках, поэтому проведена унификация категорий изоляторов в зависимости от типа их установки, климатического исполнения, степени загрязнения атмосферы, вида воздействующего напряжения, величины механических нагрузок.

Подвесные изоляторы выполняют по значению механической или электромеханической разрушающей силы на 40, 70, 120, 210, 300, 400кН.

Для разряда по загрязненной и увлажненной поверхности изолятора важным параметром является длина пути утечки изолятора - кратчайшее расстояние вдоль поверхности изолирующей детали между металлическими частями, находящимися под различными потенциалами. Изоляторы, предназначенные для работы в районах со сравнительно чистой атмосферой, обычно имеют отношение длины пути утечки (l_y) к строительной высоте (H_n) $l_y / H_n \approx 2,2$; изоляторы, предназначенные для работы в районах с загрязненной атмосферой, имеют более развитую поверхность, что позволяет увеличить длину пути утечки при неизменной строительной высоте и диаметре изолятора, т.е. увеличить отношение l_y / H_n до 2,7...3,2. Длина пути, по которому развивается разряд по загрязненной и увлажненной поверхности изолятора, называется эффективной длиной пути утечки и определяется по формуле

$$l_{y.э} = l_y / K_э \quad (1.1)$$

где l_y - длина пути утечки геометрическая;

$K_э$ - коэффициент эффективности, который зависит от отношения длины пути утечки (l_y) к диаметру изолятора (d) и характера загрязнения.

Значения коэффициента эффективности приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

l_y/d	0,9...1,05	1,06...1,1	1,1...1,2	1,21...1,30	1,31...1,40
$K_э$	1	1,05	1,1	1,15	1,2

1.3. Разрядные напряжения гирлянд изоляторов

Крепление гирлянды к траверсе опоры и провода к изоляторам осуществляется при помощи металлической арматуры. Поэтому длина гирлянды l_r (расстояние между проводом и траверсой) обычно больше строительной длины гирлянды l_c , равной произведению строительной высоты одного изолятора H_i на число изоляторов в гирлянде, при этом размеры сцепной арматуры в зависимости от класса напряжения ВЛ составляют (35...50) см.

При кратковременном воздействии напряжения (при воздействии стандартного грозового импульса) 50%-ное импульсное разрядное напряжение гирлянды из чистых изоляторов примерно на 15% превышает 50%-ное разрядное напряжение при коммутационном импульсе с временем подъема напряжения $T_n = 4000$ мкс. Увлажнение и загрязнение поверхности изоляторов практически не влияют на 50%-ное импульсное разрядное напряжение.

Разрядные напряжения гирлянд изоляторов при длительном воздействии напряжения промышленной частоты зависят от состояния их поверхности.

На рис.1.3. приведены зависимости разрядных напряжений гирлянд изоляторов при различных воздействующих напряжениях и различных состояниях поверхности изоляторов от длины гирлянды.

1.4. Изолирующая подвеска проводов

При разработке конструкции изолирующей подвески проводов необходимо в первую очередь обеспечить ее надежную работу при механических воздействиях. В нормальном эксплуатационном режиме как на анкерные, так и на промежуточные опоры в основном воздействуют вертикальные силы, обусловленные массой проводов, гололеда и изоляторов и горизонтальные силы, возникающие при ветровой нагрузке, направленной перпендикулярно трассе.

Разрушающая нагрузка, действующая на изолирующую подвеску зависит от класса напряжения ВЛ (табл.1.2.)

Таблица 1.2

Разрушающая нагрузка

$U_{ном}, \text{кВ}$	110...220	330	500	750	1150
$F, \text{кН}$	70...100	80...120	90...150	220...250	~400

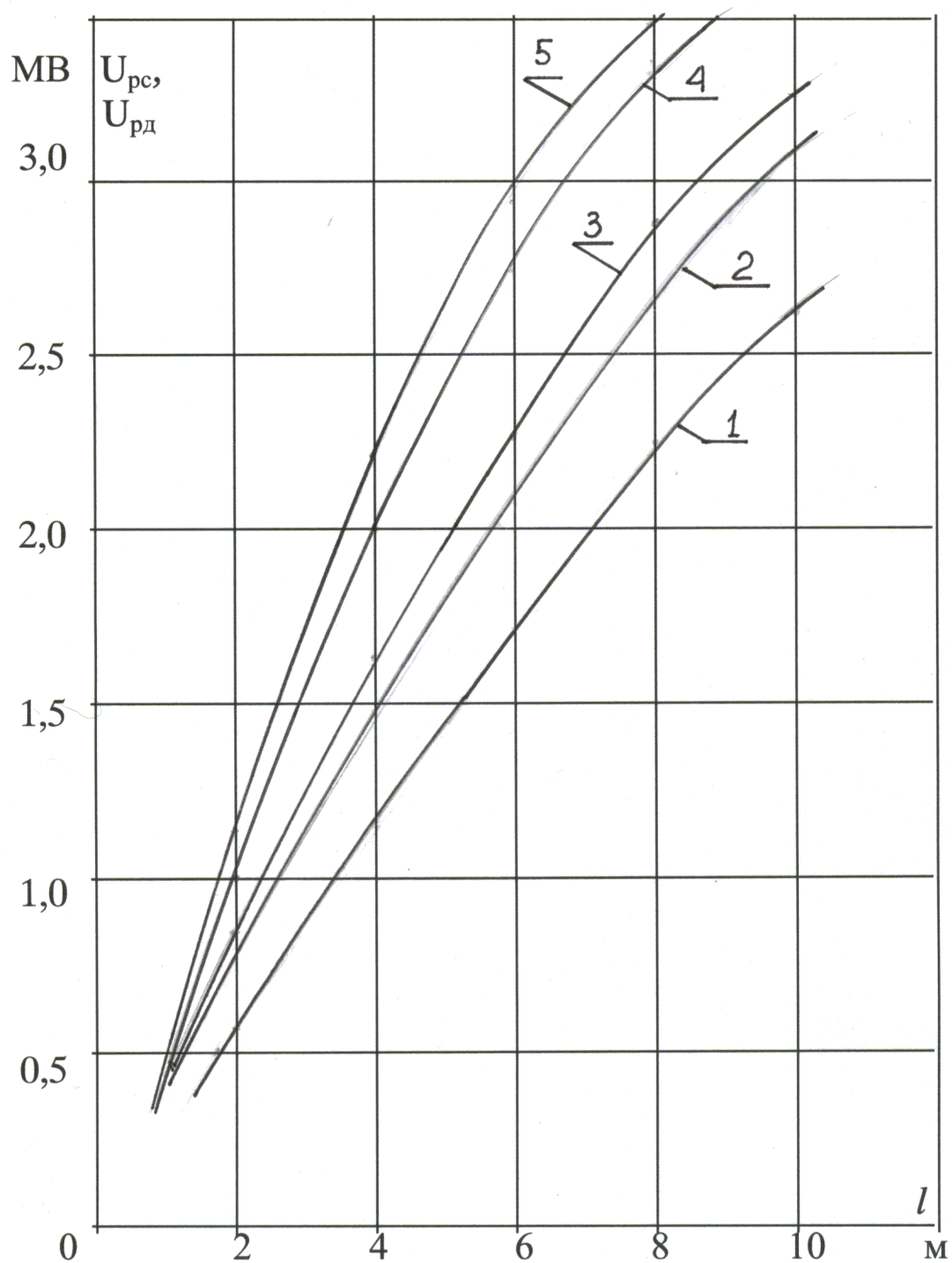


Рис.1.3. Зависимости 50%-ных (2) – (4) и средних (1) разрядных напряжений от длины гирлянды изоляторов: 1, 2 – при увлажнении дождем ($U_{рд}$); 3, 4 – в сухом состоянии ($U_{рс}$); 1 – напряжение промышленной частоты (амплитудное значение); 2, 3 – коммутационный импульс напряжения положительной полярности; 4 – грозовой импульс положительной полярности; 5 - грозовой импульс отрицательной полярности.

Поддерживающие гирлянды из тарельчатых или длинностержневых изоляторов крепятся к опоре шарнирно, поэтому при ветре гирлянды отклоняются от вертикального положения и могут приблизиться к стойке опоры.

Повышение надежности работы изоляции линии электропередачи может быть достигнуто путем замены одноцепных на двухцепные и многоцепные гирлянды.

1.5. Выбор изоляции линий по нормативным документам

При выборе изоляции в первую очередь необходимо обеспечить безопасность людей, передвигающихся под линиями, и оптимальную с экономической точки зрения надежность работы изоляции с учетом требований по допустимым уровням радиопомех и напряженности электрического поля вблизи земли.

С экономической точки зрения целесообразно выбирать изоляцию из условия ее надежной и безопасной работы при рабочем напряжении. Если при расчете по коммутационным и грозовым перенапряжениям длины воздушных промежутков или гирлянд изоляторов получаются больше рассчитанных из условия надежной работы по рабочему напряжению, то необходимо при проектировании электропередачи предусматривать мероприятия, снижающие перенапряжения до уровня, при котором обеспечивается надежная работа изоляции, т.е. привести изоляцию “к норме”.

При расчете изоляции ВЛ вначале производят выбор конструкции опоры, длины пролетов, сечения проводов и их механический расчет по нормативным нагрузкам, определяемым по климатическим условиям, характерным для территории прохождения трассы ВЛ.

Нагрузки зависят от скорости ветра, конструкции фазы, толщины гололедных отложений и других факторов. Максимальные нормативные скоростные напоры ветра и толщина гололедных отложений приведены в ПУЭ.

Расчет изоляции ВЛ начинают с выбора длины гирлянды изоляторов по рабочему напряжению. Выбор числа и типа изолятора должен производиться в зависимости от степени загрязненности атмосферы, которая имеет семь градаций.

Например, к 1-й степени загрязненности атмосферы относятся: лес, тундра, лесотундра, луга, пастбища. Ко 2-й степени загрязненности атмосферы относятся сельскохозяйственные районы, в которых ведется широкое применение химических удобрений, территория городов и промышленных районов, удаленных на определенное расстояние от источников загрязнения.

В зависимости от степени загрязненности атмосферы нормируется удельная эффективная длина пути утечки (отношение эффективной длины пути утечки гирлянды, при которой обеспечивается их надежная работа, к наибольшему линейному, длительно допустимому рабочему напряжению).

Значения нормированной удельной эффективной длины пути утечки поддерживающих гирлянд ВЛ 6-750кВ на металлических и железобетонных опорах приведены в табл 1.3.

Таблица 1.3

Нормированная удельная эффективная длина пути утечки поддерживающих гирлянд ВЛ 6...750кВ

Степень загрязненность и атмосферы	Удельная эффективная длина пути утечки $\lambda_{у.э}$, см/кВ не менее для			
	сети с изолированной нейтралью при $U_{ном}$, кВ		сети с эффективно заземленной нейтралью при $U_{ном}$, кВ	
	6...20	35	100...220	330...750
1	2,20	1,90	1,40	1,40
2	2,20	1,90	1,60	1,50
3	2,20	2,20	1,90	1,80
4	2,60	2,60	2,25	2,25
5	3,00	3,00	2,60	2,60
6	3,50	3,50	3,10	3,10
7	4,20	4,20	3,70	3,70

Количество изоляторов в гирлянде рассчитывают по формуле

$$N = \frac{\lambda_{у.э} \cdot U_{раб.наиб.} K_э}{l_{у.}}, \quad (1.3)$$

где $\lambda_{у.э}$ - удельная эффективная длина пути утечки согласно табл.1.3.; $U_{раб.наиб.}$ - наибольшее рабочее напряжение согласно ГОСТ 1516.1-76; $l_{у.}$ - длина пути утечки изолятора, см; $K_э$ - коэффициент эффективности использования длины пути утечки (см.табл1.1).

Результат расчета числа изоляторов в гирлянде округляется в большую сторону, если количество десятых превышает 3. Количество изоляторов в гирлянде увеличивается на один для ВЛ 110-150 кВ, на два для ВЛ 220-330 кВ, на 3 для ВЛ 500 кВ и на 4 на ВЛ 750 кВ и выше.

При определенном номинальном напряжении ВЛ в зависимости от типа применяемых изоляторов число изоляторов в гирлянде изменяется в следующих пределах:

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	110	220	330	500	750	1150
Количество изоляторов в гирлянде N, шт.	6...8	10...14	15...21	21...29	31...42	39...50

Расстояние от провода до стойки опоры или оттяжки при отсутствии ветра (рис.1.4) определяют как сумму наименьшего допустимого расстояния по воздуху от провода до опоры при соответствующем виде воздействующего напряжения и расстояния, на которое может отклониться провод при нормативных метеорологических условиях.

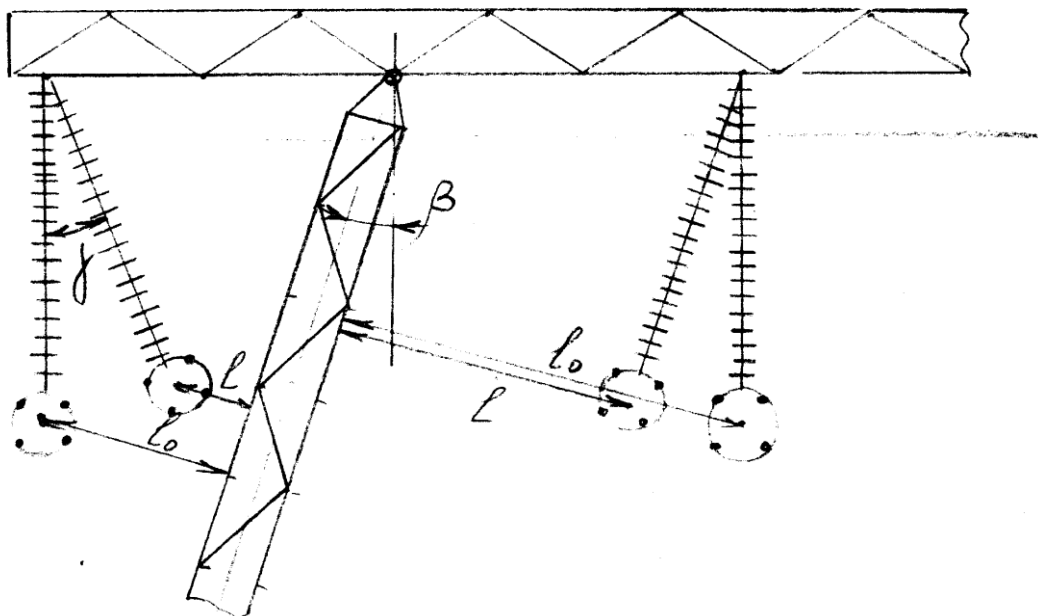


Рис1.4. К расчету расстояния между проводом и стойкой опоры.

Наименьшие допустимые изоляционные расстояния от провода до заземленной опоры приведены в табл.1.4.

Таблица 1.4

Наименьшие изоляционные расстояния по воздуху от токоведущих до заземленных частей в метрах.

	Номинальное напряжение, кВ					
Расчетные условия	110	220	330	500	750	1150
По грозовым перенапряжениям:	1,00	1,80	2,60	3,20	4,20	5,10
По внутренним перенапряжениям	0,80	1,60	2,15	3,00	3,90	4,80
По рабочему напряжению	0,25	0,55	0,80	1,15	1,50	2,00
По условию безопасности подъема на опору	1,50	2,50	3,50	4,50	5,85	7,35

Изоляционные расстояния выбраны по опыту эксплуатации и по разрядным характеристикам с определенным запасом, который обеспечивает малую вероятность пробоя совокупности многих элементов при рабочем напряжении, коммутационных и грозовых перенапряжениях, а также безопасность подъема обслуживающего персонала на опору линии электропередачи, находящейся под напряжением.

При проектировании ВЛ выбирается наибольшее из расчетных расстояний от провода до опоры при отсутствии ветра.

При расчете отклонения гирлянды принимают следующие сочетания климатических условий:

- при рабочем напряжении принимается максимальный нормативный скоростной напор ветра ($g_{\max}$) при $T = -5^{\circ}\text{C}$;
- при грозовых и внутренних перенапряжениях $T = 15^{\circ}\text{C}$, скоростной напор ветра $g = 0,1 g_{\max}$, но не менее $g = 62,5\text{Н/м}^2$;
- по условию безопасности подъема на опору $T = -15^{\circ}\text{C}$, ветер и гололед отсутствуют, так как при сильном ветре, гололеде, грозе запрещен подъем на опору.

Угол отклонения проводов на опоре определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{KCgA \sin^2 \varphi}{G_{np} + 0,5G_{\Gamma}}, \quad (1.4)$$

где g - нормативный скоростной напор ветра, Н/м²; C - коэффициент лобового сопротивления, принимаемый равным 1,2 для проводов покрытых гололедом, и 1,1 - при отсутствии гололеда; A - площадь сечения провода при гололеде с учетом нормативной толщины стенки гололеда (принимается для высоты 10 м над поверхностью земли в зависимости от района по гололеду от 5 до 20 мм), м²; φ - угол между направлением ветра и осью ВЛ; G_{np} - нагрузка на гирлянду от веса проводов; G_{Γ} - вес гирлянды; K - коэффициент, учитывающий неравномерность скоростного напора ветра по пролету ВЛ и динамику отклонения провода, принимаемый равным:

K	1	0,73	0,61	0,55	0,48
g , Н/м ²	270	500	650	800	1200

При выборе расстояний между проводами или проводом и тросом учитывается возможность возникновения автоколебательного процесса на одной из собственных частот провода в пролете с большой амплитудой так называемой пляски проводов. Пляска проводов возникает при поперечном ветре со скоростью $V_b = (8...16)$ м/с и особом профиле сечения проводов, образующемся в результате гололедообразования. Минимальное расстояние S по условию сближения между проводами при ВЛ с горизонтальным расположением и свободной подвеской проводов определяется по формуле, м:

$$S = 1,0 + U_{ном} / U_0 + 0,6 \sqrt{f_n} + 0,15b; \quad (1.5)$$

где $U_{ном}$ - номинальное напряжение ВЛ, кВ; U_0 - напряжение, равное 110 кВ; f_n - наибольшая стрела провеса, соответствующая габаритному пролету, м; b - толщина стенки гололеда, м, но не более 0,02 м.

Электрическая прочность воздушных промежутков “фаза-стойка опоры” с учетом отклонения проводов и гирлянды изоляторов при различных видах воздействующих напряжений должны быть примерно одинаковы. Поэтому требуемые $U_{p0,5}$ для воздушных промежутков определяются по рис.1.3, а допустимые длины воздушных промежутков (l) определяются по рис.1.1.

Зная длину гирлянды изоляторов (l_r) и допустимое расстояние между отклоненной гирляндой и стойкой опоры (l), определим минимальное расстояние от оси провода до стойки опоры при отсутствии ветра по формуле

$$l_0 = \cos \beta * (l \cos \beta + l_r \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}}), \quad (1.6)$$

где β - угол между осью стойки и вертикалью (см. рис. 1.4); $\operatorname{tg} \gamma$ определяется согласно (1.4).

Убедимся, что реальные изоляционные промежутки для заданного типа опор не меньше рассчитанных допустимых промежутков. При дальнейших расчетах необходимо определять электрическую прочность промежутков для заданного типа опор.

По опыту эксплуатации ВЛ 110...500 кВ известно, что все отключения при пересечении трассы ВЛ негабаритными машинами выше 4,5 м происходили в нормальном эксплуатационном режиме, что говорит о малой вероятности совпадения времени возникновения перенапряжений с моментом пересечения трассы ВЛ негабаритными машинами. Следовательно, выбирать габариты ВЛ над землей нужно в соответствии с условиями надежной работы при наибольшем рабочем напряжении. Опыт эксплуатации ВЛ 110 кВ наибольшей протяженностью показал, что при габарите провода над землей 6 м практически отсутствовали перекрытия на негабаритные машины. Можно считать, что пересечение трассы ВЛ негабаритными машинами высотой $H_1 > 5,75$ м маловероятно. Приняв высоту $H_1 = 5,75$ м за базовую, габариты проводов над землей для ВЛ на более высокие напряжения можно определить как сумму высоты H_1 и наименьшего изоляционного расстояния по воздуху от токоведущих до заземленных частей ВЛ табл. 1.4.

Для ВЛ 750 кВ и выше высота провода выбирается по условию устранения вредного влияния электрического поля на живые организмы, в первую очередь на людей, т.е. такой, чтобы напряженность электрического поля на расстоянии 1,8 м от земли (высота роста человека) не превышала $E = 15$ кВ/м в населенной местности. При меньших напряжениях ВЛ высота провода над землей выбирается по условию безопасного проезда под линией.

3. Определение параметров расчетной схемы.

2.1. Определение параметров воздушной линии электропередачи.

Для проведения дальнейших расчетов необходимо рассчитать следующие параметры ВЛ.: индуктивности, емкости, волновое сопротивление и волновую длину линии прямой последовательности.

Для расчета этих параметров ВЛ необходимо определить средние в пролете высоты подвеса проводов и тросов. Они определяются на основе габаритов опор и изолирующей подвески, полученных при выполнении предыдущего раздела курсовой работы. Чертеж опоры с изолирующей подвеской, проводами и тросами следует привести в пояснительной записке в формате А4.

Погонные индуктивности и емкости линии прямой последовательности могут быть определены по выражениям

$$\left. \begin{aligned} L_{noz1} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_{cp.z.}}{r_{\text{экв.}} \sqrt{\delta}}, \\ C_{noz1} &= \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d_{cp.z.}}{r_{\text{экв.}}}} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м ,

$\epsilon_0 = 1/36\pi \cdot 10^{-9}$ Ф/м ,

$d_{cp.z.} = \sqrt[3]{d_{ab} \cdot d_{ac} \cdot d_{bc}}$ - среднегеометрическое расстояние между фазами,

$r_{\text{экв.}} = \sqrt[n]{r_{np}^n \cdot r_p^{n-1} \cdot n}$ - эквивалентный радиус расщепленной фазы,

r_{np} - радиус провода,

$r_p = \frac{a}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}}$ - радиус расщепления фазы,

a - расстояние между соседними проводами расщепленной фазы (для ВЛ 330кВ и выше примем $a=40$ см),

n - число составляющих расщепленной фазы,

δ - коэффициент, учитывающий влияние магнитного потока в проводе на величину индуктивности (для проводов типа АС $\delta=0,81$).

Волновое сопротивление линии и ее волновая длина для прямой последовательности фаз определяются как

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_{noz1}}{C_{noz1}}}, \quad \text{Ом}, \quad (2.2)$$

$$\lambda = \omega \cdot l_{\text{ВЛ}} \cdot \sqrt{L_{noz1} \cdot C_{noz1}}, \quad \text{радиан}. \quad (2.3)$$

или $\lambda = 18 \cdot 10^3 \cdot l_{\text{ВЛ}} \cdot \sqrt{L_{noz1} \cdot C_{noz1}}, \quad \text{град.},$

$l_{\text{ВЛ}}$ - длина линии электропередачи.

Погонные параметры линии электропередачи могут быть определены также с помощью программы PARAMETR. Рассчитанные по программе фазные и междупазные индуктивности усредняются, и по ним определяются индуктивности, емкости, волновое сопротивление и волновая длина для прямой последовательности фаз.

$$\begin{aligned}
 C_{\phi} &= \sqrt[3]{C_{\phi c} C_{\phi b} C_{\phi c}}, \\
 L_{\phi} &= \sqrt[3]{L_{\phi a} L_{\phi b} L_{\phi c}}, \\
 C_{\phi\phi} &= \sqrt[3]{C_{bc} C_{ab} C_{ac}}, \\
 M_{\phi\phi} &= \sqrt[3]{M_{bc} M_{ab} M_{ac}}, \\
 C_{noz1} &= C_{\phi} + 3C_{\phi\phi}, \\
 L_{noz1} &= L_{\phi} - M_{\phi\phi}.
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

2.2. Определение параметров примыкающих систем.

Электропередача, принципиальная схема которой представлена на рис.2.1., содержит две системы заданной мощности, соединенные между собой воздушной линией электропередачи. Подключение ВЛ к отправной и приемной системой осуществляется с помощью выключателей В1 и В2. На линии могут быть установлены шунтирующие реакторы (Р1 и Р2) и нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН1 и ОПН2).



Рис.2.1. Схема электропередачи.

Суммарные реактивности систем могут быть определены по формуле

$$X_{ci} = \frac{U_{ном}^2}{S_{ci}}.
 \tag{2.5.}$$

3. Грозоупорность воздушных линий электропередачи

Критерием грозоупорности ВЛ считается число отключений линии в год вследствие грозовых поражений. При определении числа отключений линии учитывают следующие расчетные случаи поражения ВЛ:

- удар молнии в провод с последующим перекрытием изоляции между проводом и опорой или между проводами;
- удар молнии в вершину опоры с последующим перекрытием изоляции между опорой и проводом;
- удар молнии в трос в середине пролета с последующим перекрытием изоляции с троса на провод или на землю;

Рассчитав число грозовых отключений ВЛ при каждом из перечисленных воздействий можно определить суммарное число грозовых отключений в год.

$$n_{\text{с.откл}} = n_{\text{откл}}^{np} + n_{\text{откл}}^{on} + n_{\text{откл}}^{mp}, \quad (3.1)$$

где $n_{\text{откл}}^{np}$, $n_{\text{откл}}^{on}$, $n_{\text{откл}}^{mp}$ - число отключений при ударах молнии в провод, опору и трос, соответственно.

3.1. Определение числа отключений ВЛ при ударах молнии в провода

Число прямых ударов молнии в линию электропередачи равно

$$N_{\text{ПУМ}} = N_{\text{ПУМ}}^* \frac{l}{100} \frac{N_{\text{Г.Ч.}}}{100}, \quad (3.2)$$

где $N_{\text{ПУМ}}^*$ - удельное число ударов молнии на 100 км длины линии и 100 грозовых часов, определяемое как

$$N_{\text{ПУМ}}^* \approx 4h_{\text{ср}}^{mp} \text{ - для ВЛ с тросами,}$$

$$N_{\text{ПУМ}}^* \approx 6h_{\text{ср}}^{np} \text{ - для ВЛ без тросов,}$$

$h_{\text{ср}}^{mp} = h_{\text{тр}} - \frac{2}{3}f_{\text{тр}}$ - средняя высота подвеса троса на линиях с тросами, в метрах;

$h_{\text{ср}}^{np} = h_{\text{пр}} - \frac{2}{3}f_{\text{пр}}$ - средняя высота подвеса верхнего провода на линиях без тросов, в метрах;

$f_{\text{тр}}$, $f_{\text{пр}}$ - стрелы провеса троса и провода, в метрах;

$h_{\text{тр}}$, $h_{\text{пр}}$ - высоты точки подвеса троса и верхнего провода, в метрах.

На линиях без тросов все удары молнии приходятся в провод, на линиях с тросами число ударов молнии в провод равно

$$n_{ПУМ}^{np} = N_{ПУМ} P_{np}. \quad (3.3)$$

Вероятность прорыва молнии на фазные провода (P_{np}) (при отсутствии тросов $P_{np} = 1$) зависит от угла защиты тросов α и высоты подвеса троса на опоре и определяется по формуле:

$$\lg P_{np} = \frac{\alpha \sqrt{h_{mp}}}{75} - 3.95 \quad (3.4)$$

(α - в градусах, h_{mp} - в метрах).

Число перекрытий изоляции ВЛ равно:

$$n_{пер} = n_{ПУМ}^{np} P_{пер},$$

где $P_{пер}$ - вероятность перекрытия изоляции при попадании молнии в провод, зависящая от напряжения, приложенного к изоляции и от ее прочности.

Амплитуда волны напряжения, распространяющейся по проводу в обе стороны от места удара, определяется по схеме приведенной на рис. 3.1.

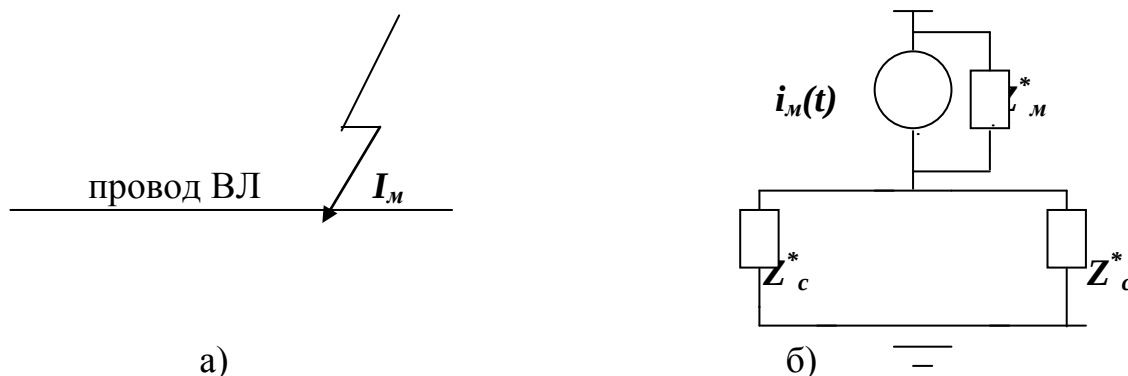


Рис. 3.1. Эквивалентная схема для расчета величины напряжения на проводе при ударе молнии в провод.

Согласно схеме рис. 3.1 б напряжение на проводе при ударе молнии равно $U_{np} = I_M z_c^* / 2$, где z_c^* - волновое сопротивление провода с учетом короны.

Волна напряжения может вызвать перекрытие изоляции на опоре, если ее амплитуда (U_{np}) превысит импульсное разрядное напряжение гирлянды изоляторов ($U_u^{(-)}$) при полной отрицательной волне (рис. 1.3).

Вероятность перекрытия фазной изоляции при этом можно определить по следующей формуле:

$$P_{nep} = P(U_{np.} \geq U_u^{(-)}) = P(I_m \geq I_z), \quad (3.5)$$

где I_z - уровень грозоупорности ВЛ, кА,

$$I_z = \frac{2U_u^{(-)}}{z_c^*}. \quad (3.6)$$

Волновое сопротивление коронирующего провода z_c^* определяется по формуле:

$$z_c^* = z_{сф} \frac{F(\theta)}{\sqrt{\ln \frac{2h_{np}^{cp}}{r_{экв}}}}, \quad (3.7)$$

где $z_{сф} = 60 \ln \frac{2h_{np}^{cp}}{r_{экв}}$ - среднегеометрическое волновое сопротивление фазы;

$F(\theta)$ - функция, определяемая из графика рис. 3.2, на котором по оси абсцисс

отложены значения $\theta = \frac{U}{2h_{np}^{cp} E_{cp}}$; U – напряжение на проводе, принимаемое

равным $U_u^{(-)}$; E_{cp} - средняя напряженность поля на поверхности коронного чехла, принимаемая для положительной волны $E_{cp}^+ = 900$ кВ/м, для отрицательной волны $E_{cp}^- = 2100$ кВ/м.

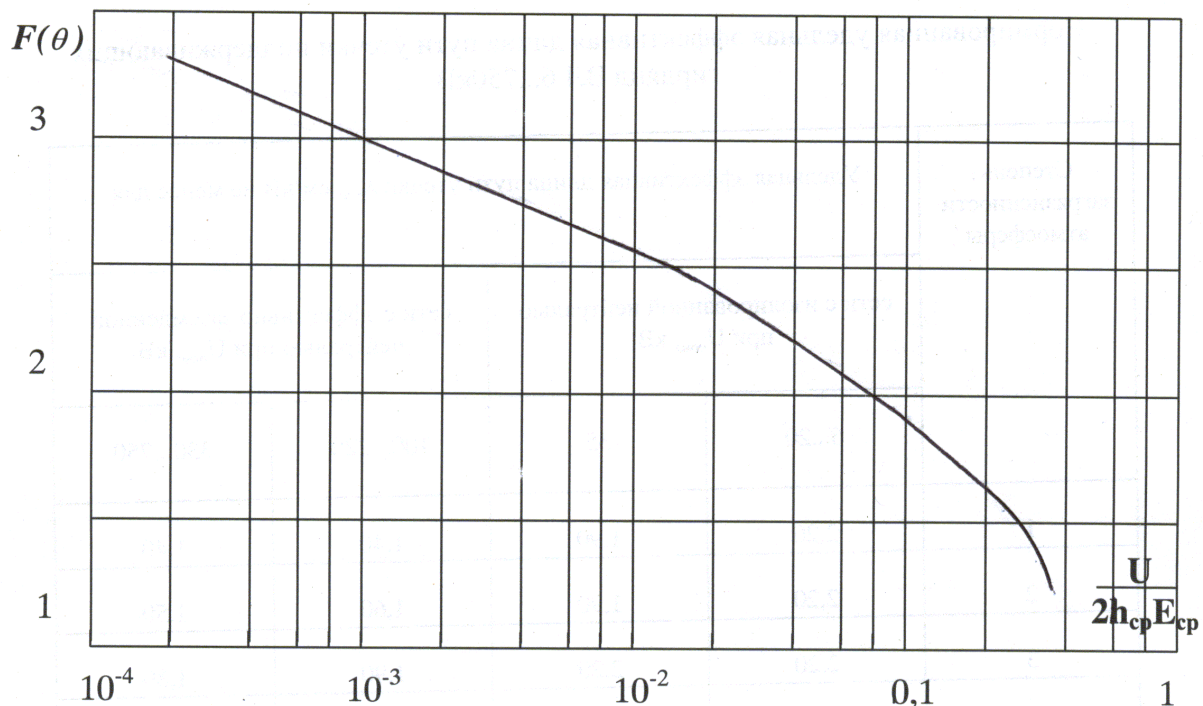


Рис.3.2. Вспомогательная кривая для расчета поправок на корону для волновых сопротивлений и коэффициентов связи тросов и проводов.

Вероятность перекрытия изоляции определяется из выражения:

$$\lg P_{пер.} = 0,666 - \sqrt{\frac{I_3}{25}}. \quad (3.8)$$

Отключение линии происходит лишь в том случае, когда на месте искрового перекрытия образуется силовая дуга. Число отключений можно определить как

$$n_{откл}^{np} = n_{пер} P_{\partial}. \quad (3.9)$$

Вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу вычисляется по формуле:

$$P_{\partial} \approx 1,6 \frac{U_{раб}}{l_{пер}} - 0,06, \quad (3.10)$$

где $U_{раб}$ - наибольшее эффективное значение рабочего напряжения вдоль пути перекрытия, кВ,

$l_{пер}$ - суммарная длина пути импульсного перекрытия гирлянды, м.

Вычисленную по формуле (3.10) вероятность установления дуги принимают равной 0,1, если она получилась меньше этого значения и равной единице, если при вычислениях она получилась больше единицы.

3.2. Определение числа отключений при ударе молнии в опору

Для линий с грозозащитными тросами существенное значение имеет вероятность обратного перекрытия изоляции при ударе молнии в опору. Число отключений вследствие обратных перекрытий при этом равно:

$$n_{откл}^{оп} = N_{ПУМ} P_{он} P_{пер.}^{он} P_{\partial}, \quad (3.11)$$

где $P_{он} = \frac{4h_{mp}}{l_{np}}$ - вероятность попадания молнии в опору или в трос вблизи

опоры; l_{np} - длина пролета, в метрах; h_{mp} - высота подвеса троса на опоре, в метрах; P_{∂} - вероятность образования силовой дуги (определяется по выражению (3.10)); $P_{пер.}^{он}$ - вероятность перекрытия изоляции при попадании молнии в опору.

Обратное перекрытие гирлянды изоляторов может произойти, если напряжение на гирлянде достигнет или превзойдет ее импульсную прочность.

Напряжение на гирлянде зависит от импульсного сопротивления заземления, от индуктивности опоры, от взаимных индуктивностей между каналом молнии тросом и опорой.

По упрощенной методике вероятность обратного перекрытия определяется по формуле:

$$\lg P_{пер.}^{он} = - \frac{U_u^{(+)}}{h_{mp} (pR_{з.и} + q)}, \quad (3.12)$$

где $U_u^{(+)}$ (10) - импульсная прочность гирлянды при положительной полярности (рис. 1.3), кВ;

$R_{з.и}$ - импульсное сопротивление заземления опоры, Ом;

p и q - коэффициенты, зависящие от конструкции опоры (Табл. 3.1).

Расчетные значения параметров p и q для воздушных линий различного конструктивного выполнения

Тип опоры	$U_{ном}$ кВ	Материал опор			
		Металл		Железобетон	
		p	Q	P	q
Башенная или одностоечная с одним тросом Треугольное расположение проводов	110	1,040	24,60	1,055	26,70
	220	0,755	21,60	0,855	25,70
	330	0,775	22,05	-	-
То же, но с двумя тросами	220	0,515	18,05	-	-
	330	0,540	18,75	-	-
Портальная или П-образная свободностоящая с двумя тросами. Горизонтальное расположение проводов.	110	-	-	-	-
	220	-	-	-	-
	330	-	-	0,82	23,20
	500	0,635	21,80	-	-
	750	-	-	-	-
	1150	-	-	-	-
Портальная на оттяжках с двумя тросами. Горизонтальное расположение проводов.	220	0,695	19,60	0,720	20,60
	330	0,745	20,80	0,775	21,75
	500	0,740	21,45	0,735	23,44
	750	0,750	21,50	-	-
	1150	0,750	21,50	-	-

3.3. Определение числа отключений при обратных перекрытиях с троса на провод

При ударе молнии в трос в середине пролета на нем возникают волны напряжения $U_{тр} = I_m z_{тр}^* / 2$, которые, дойдя до опор, отражаются с обратным знаком. Максимальное напряжение на тросе соответствует моменту прихода отраженной от опоры волны и зависит в основном не от ее амплитуды, а от крутизны тока молнии и может достигать величины нескольких мегавольт. При этом принципиально возможны следующие случаи повреждения изоляции:

- перекрытие промежутка “трос-земля” мимо провода”,
- обратное перекрытие гирлянды на ближайшей опоре.

Опыт эксплуатации ВЛ показал, что число перекрытий изоляции на опоре при ударе молнии в трос в середине пролета на два-три порядка меньше, чем в случае попадания молнии в опору, а вероятность пробоя с троса на провод также пренебрежимо мала, если расстояние “трос-провод” на вертикали составляет не менее 2 % от длины пролета.

В этом случае принято считать, что $n_{откл}^{тр} \approx 0$.

4. Расчет коммутационных перенапряжений при повторном включении линии в цикле АПВ

Изоляция ВЛ, выбранная исходя из условия ее надежной работы в нормальном эксплуатационном режиме, должна удовлетворять требованиям достаточной надежности и при осуществлении тех или иных коммутаций. Характеристикой надежности изоляции ВЛ может быть вероятность ее перекрытия при коммутационных перенапряжениях ($P_{КП}$).

За расчетную коммутацию примем включение линии в цикле АПВ по следующим причинам:

- эта коммутация, осуществляемая после отключения короткого замыкания на ВЛ, приводит к достаточно высокому уровню перенапряжений,
- перекрытие изоляции при ее осуществлении приведет к отключению линии и, следовательно, к перерыву электроснабжения по ВЛ на некоторое время.

4.1. Расчет установившихся режимов односторонне включенной ВЛ

Рассмотрим установившийся режим линии электропередачи, с одной стороны подключенной к источнику э.д.с. через реактивное сопротивление X_c и замкнутой на конце линии на сопротивление X_n (расчетная схема на рис.4.1).

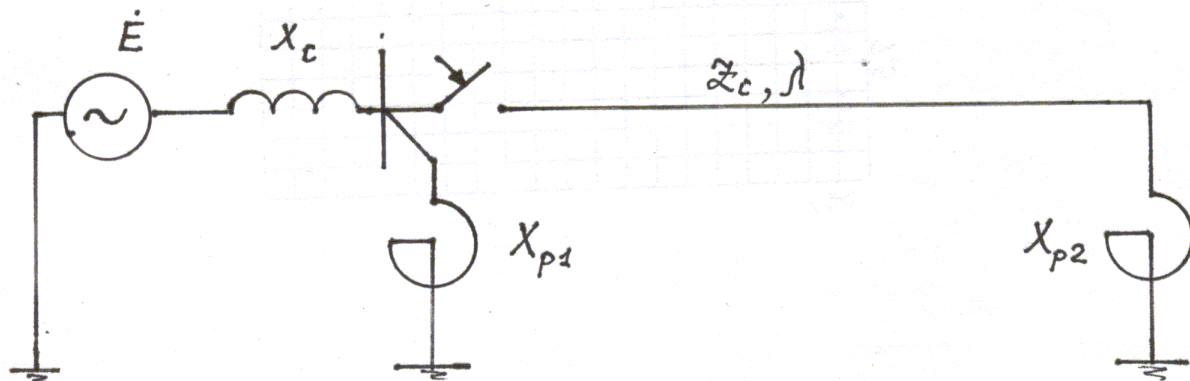


Рис 4.1. Расчетная схема электропередачи

Связь между токами и напряжениями в начале и в конце линии запишется в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} U_n &= U_k * \cos \lambda + j I_k * \sin \lambda, \\ I_n &= j \frac{U_n}{Z_c} * \cos \lambda + I_k * \sin \lambda, \\ E &= U_n + j X_c * I_n, \\ U_k &= j X_n * I_k. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Из приведенной системы уравнений получим выражение для напряжения в конце линии U_k , которое представляет собой вынужденную составляющую (установившееся значение) перенапряжений $U_{вын.}$, возникающих при любой коммутации (включении или отключении), в которой имеет место одностороннее питание ВЛ:

$$U_{вын.} = \frac{E_s * \cos \alpha_s * \sin \alpha_n}{\sin (\varphi + \alpha_s + \alpha_n)}, \quad (4.2)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \arctg \left(\frac{X_s}{Z_c} \right), \\ \alpha_n &= \arctg \left(\frac{X_{p2}}{Z_c} \right), \\ X_s &= \frac{X_c * X_{p1}}{X_c + X_{p1}}, \\ E_s &= \frac{E * X_{p1}}{X_c + X_{p1}}. \end{aligned}$$

В случае отсутствия сопротивления нагрузки в конце линии вынужденную составляющую напряжения можно определить следующим образом:

$$U_{вын.} = \frac{E_s * \cos \alpha_s}{\cos (\varphi + \alpha_s)} \quad (4.3)$$

Режим одностороннего питания возникает и при плановом включении линии. В этом случае необходимо проверить возможность синхронизации

электропередачи. При синхронизации – процессе, длительность которого может составить секунды и минуты - напряжение на изоляции не должно превышать $U_{\max \text{ синхр.}}$, что составляет:

- $1,2 U_{\phi}$ для $U_{\text{ном}} = 500$ кВ и ниже,
- $1,1 U_{\phi}$ для $U_{\text{ном}} = 750$ кВ,
- $1,05 U_{\phi}$ для $U_{\text{ном}} = 1150$ кВ.

На ВЛ высших классов напряжения (начиная с 500 кВ и выше) снизить уровень напряжения на линии в режиме синхронизации можно при подключении к ней в данном режиме дополнительных шунтирующих реакторов.

На линиях 110, 220, 330 кВ для снижения напряжения в конце ВЛ в режиме синхронизации следует понижать напряжение на шинах ВЛ путем переключения отпаяк трансформаторов.

Суммарная мощность и количество реакторов на ВЛ 500 кВ и выше выбирается по условиям обеспечения допустимого уровня напряжения в режиме передачи минимальной мощности по линии.

Расчеты показывают, что располагаемая мощность реакторов может быть выбрана исходя из требования компенсации определенной доли реактивной емкостной мощности, генерируемой ВЛ в этом режиме. Необходимая степень компенсации K_p для линий электропередачи разных классов напряжения составляет:

- $K_p = 0,6$ - для ВЛ 500 кВ,
- $K_p = 0,7$ - для ВЛ 750 кВ,
- $K_p = 0,8$ - для ВЛ 1150 кВ.

Суммарная реактивная мощность (трехфазная), генерируемая линией, может быть определена по формуле

$$S_{\varepsilon} = \frac{2U_{\text{ном}}^2}{Z_c * \operatorname{ctg} \frac{\lambda}{2}}. \quad (4.4)$$

При этом требуемая мощность реакторов определится как

$$S_p^* = K_p * S_{\varepsilon} \quad (4.5)$$

Поскольку единичные мощности реакторов дискретны, то требуемая мощность реакторов S_p должна удовлетворять условию

$$S_p = n_p * S_{p.\text{ед.}} > S_p^*, \quad (4.6)$$

где n_p - число реакторов на линии,

$S_{p.\text{ед.}}$ - единичная мощность реакторов, равная

180 МВАР при $U_{\text{ном.}} = 500$ кВ,

300 МВАР при $U_{\text{ном.}} = 750$ кВ,

900 МВАР при $U_{\text{ном.}} = 1150$ кВ.

В случае неодинакового числа реакторов по концам ВЛ, а так же разных мощностях систем по концам ВЛ возможно предусмотреть программированное включение линии, т.е. ее включение со стороны той системы, с которой напряжение на разомкнутом конце линии будет минимальным.

В максимальном режиме работы электропередачи для поддержания уровня напряжения на ней оставляют включенными примерно 50% имеющихся реакторов. Поскольку отключение линии вследствие аварии может произойти и в максимальном режиме, следует определять вынужденную составляющую напряжения на конце ВЛ ($U_{вын}$) и для этого режима. Допустимая величина $U_{вын}$ в максимальном режиме определяется условиями работы аппаратов для защиты от коммутационных перенапряжений и не должна превышать $(1,2 \dots 1,25)U_{\phi}$.

4.2. Определение закона распределения максимальных перенапряжений при включении ВЛ и выбор мер ограничения перенапряжений

Перенапряжения, возникающие при включении линии в цикле АПВ, являются случайными величинами, зависящими от двух случайных факторов: угла включения э.д.с. ψ и остаточного напряжения на линии U_0 (U_0 - напряжение на отключенной линии к моменту повторного ее включения). Примем для упрощения эти две случайные величины независимыми.

Согласно статистическим данным в случае, если коммутация осуществляется быстродействующими выключателями типа ВВБ, то случайные значения ψ и U_0 могут быть приняты распределенными по закону равномерной плотности в диапазонах:

$$\begin{aligned} -\pi/2 &\leq \psi \leq \pi/2, \\ -0,8U_{вын} &\leq U_0 \leq -0,3U_{вын}, \\ 0,3U_{вын} &\leq U_0 \leq 0,8U_{вын}. \end{aligned}$$

Расчеты и эксперименты, проведенные ранее, показывают, что при известных законах распределения ψ и U_0 закон распределения максимальных напряжений на линии весьма близок к нормальному. При этом математическое ожидание и дисперсию максимальных перенапряжений можно определить как

$$MU_{\max} \cong U_{\max}(0, \pi/2), \quad (4.7)$$

$$\sigma U_{\max} \cong 0,323 * U_{вын}^2. \quad (4.8)$$

Таким образом для определения математического ожидания максимальных перенапряжений достаточно рассчитать перенапряжения в схеме, приведенной на рис.4.1 при нулевом начальном напряжении на линии и при угле включения э.д.с. равном $\pi/2$.

Для проведения расчетов используем специально разработанную программу, исходными данными для которой являются:

- номинальное напряжение ВЛ;
- длина ВЛ;
- волновое сопротивление ВЛ по прямой последовательности;
- индуктивность примыкающей системы;
- индуктивности шунтирующих реакторов;
- начальное напряжение на линии U_0 ;
- угол включения э.д.с. ψ ;
- параметры ОПН;
- величина шунтирующего сопротивления на контактах выключателя;
- время нахождения $R_{ш}$ в работе.

В результате расчета получаем осциллограммы изменения напряжения в начале, в середине и в конце ВЛ при отсутствии мер защиты от перенапряжений. Сравнив полученные величины с разрядным напряжением гирлянд изоляторов при воздействии коммутационных импульсов под дождем, сделаем вывод о целесообразности ограничения коммутационных перенапряжений для рассматриваемой ВЛ.

Примем, что основной мерой защиты от коммутационных перенапряжений в линиях высших классов напряжения является применение нелинейного ограничителя перенапряжений (ОПН). Поэтому для оценки надежности работы изоляции при коммутационных перенапряжениях в линиях, оснащенных ОПН, рассчитаем для таких ВЛ амплитуды максимальных перенапряжений на линии.

4.3. Определение вероятности перекрытия изоляции ВЛ при включении в цикле АПВ

При осуществлении единичной коммутации включения линии в цикле АПВ перенапряжениям подвергается большое число изоляционных промежутков на всех опорах включаемой линии. Поскольку определение перенапряжений при расчетах на ЭВМ производилось лишь в трех точках линии, заменим расчетную кривую распределения максимальных перенапряжений, приведенную на рис.4.2. (сплошная линия), ступенчатой кривой (пунктирная линия), состоящей из 3-4 участков. Будем считать, что на каждом из участков к изоляционным промежуткам прикладывается одинаковое напряжение.

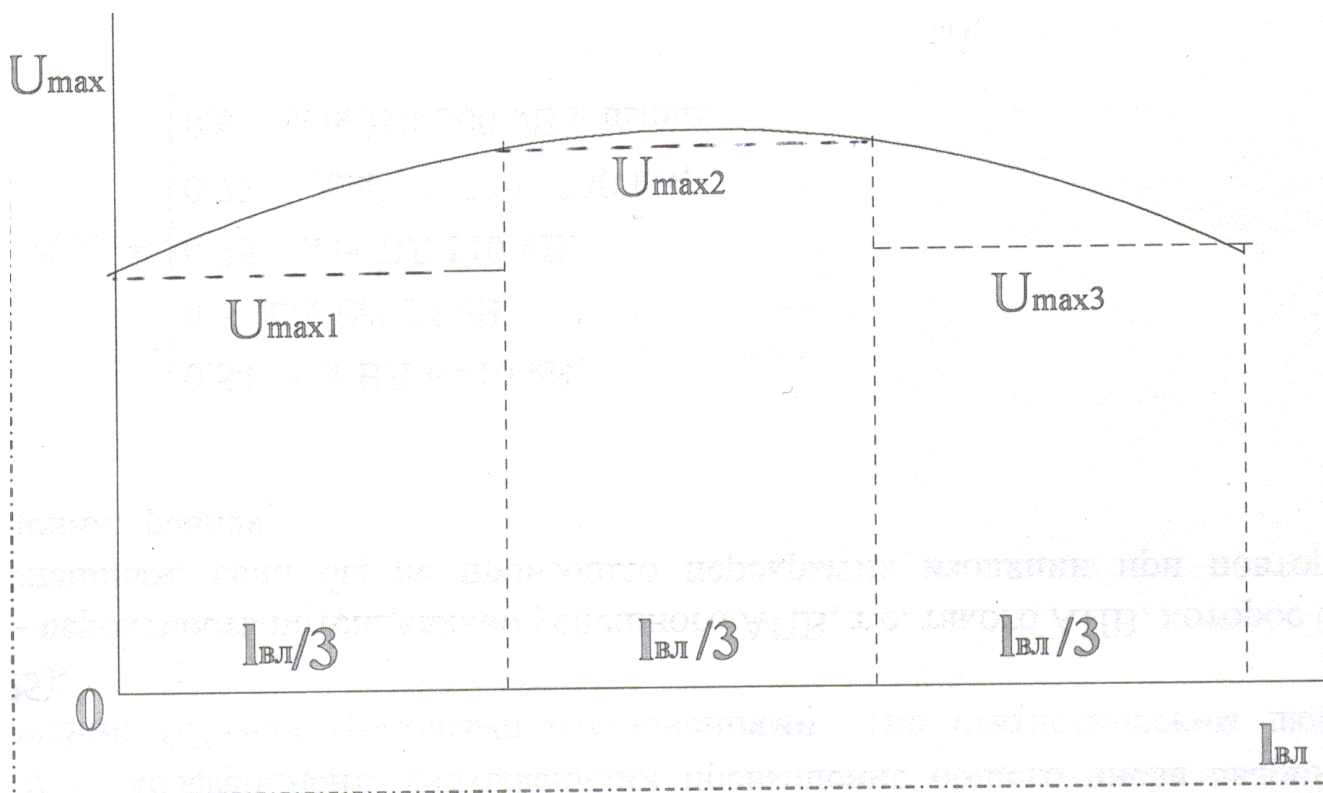


Рис.4.2.Истинное (сплошная линия) и принимаемое в расчетах (пунктирная линия) распределение максимальных перенапряжений вдоль линии.

Число опор, приходящихся на каждый участок разбиения ВЛ при одинаковой длине этих участков, определится как

$$n_{оп.} = \frac{l_{ВЛ}}{m * L_{пр}} , \quad (4.9)$$

где $L_{пр.}$ – длина пролета между соседними опорами,
 m – число участков разбиения.

На каждой опоре число промежутков провод-траверса (1) равно трем, а число промежутков провод – стойка опоры (2) в отклоненном под воздействием ветра состоянии равно двум, так как для одной гирлянды, отклоненной в противоположную от опоры сторону, пробой с провода на стойку опоры невозможен. Поэтому число промежутков каждого типа на одном участке разбиения равно

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \frac{3l_{ВЛ}}{m * L_{пр.}} , \\ n_2 &= \frac{2l_{ВЛ}}{m * L_{пр.}} . \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

При нормальном законе распределения разрядных напряжений изоляционных промежутков и максимума воздействующих перенапряжений вероятность пробоя одного промежутка заданного типа ($j = 1, 2$), из находящихся под одинаковым напряжением на i -том участке разбиения определится как

$$P_{из.i,j}^{(1)} = \frac{1}{2} - \Phi_0\left(\frac{U_{0,5;j} - U_{m,j}}{\sigma_j}\right), \quad (4.11)$$

где

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \text{функция Лапласа (интеграл вероятности)},$$

$U_{0,5;j}$ - разрядное напряжение промежутка типа j на i -том участке разбиения при коммутационных перенапряжениях,

σ_j - оценка среднеквадратического отклонения разрядного напряжения для промежутков типа j (для промежутка провод-траверса $\sigma_1 = 0,069U_{0,5;1}$, для промежутка провод-стойка опоры $\sigma_2 = 0,061U_{0,5;2}$).

Вероятность перекрытия хотя бы одного из системы промежутков j -того типа на i -том участке разбиения найдется как

$$P_{из.i,j} = 1 - \left[\frac{1}{2} - \Phi_0\left(\frac{U_{0,5;j} - U_{m,i}}{\sigma_j}\right) \right]^{n_{i,j}}, \quad (4.12)$$

где $n_{i,j}$ - число изоляционных промежутков j -го типа на i -том участке разбиения.

При реальных габаритах промежутков и правильно выбранных параметрах защитных устройств вероятность перекрытия системы изоляционных промежутков должна быть достаточно малой. Следовательно, малыми должны быть и вероятности перекрытия единичных промежутков. При этом выражение (4.12) можно заменить более простым выражением:

$$P_{из.i,j} = n_{i,j} * \left[\frac{1}{2} - \Phi_0\left(\frac{U_{0,5;j} - U_{m,i}}{\sigma_j}\right) \right]. \quad (4.13)$$

На рис.4.3. приведены значения $P = \frac{1}{2} - \Phi_0\left(\frac{U_{0,5;j} - U_{m,i}}{\sigma}\right)$, входящие в выражение (4.12) для определения вероятности перекрытия системы изоляционных промежутков j -го вида на i -том участке разбиения ВЛ

При включении линии вероятность перекрытия изоляции определится как

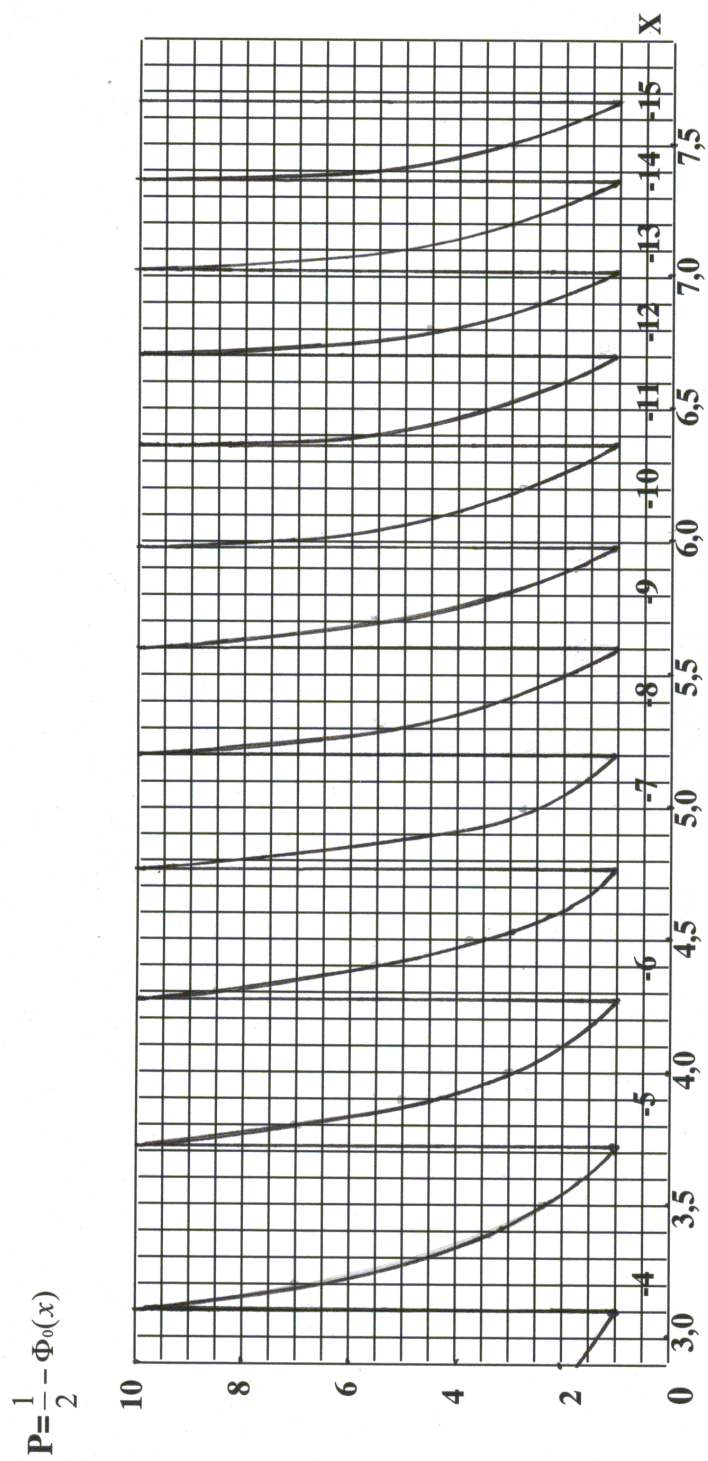


Рис.4.3. Значения $\frac{1}{2} - \Phi_0(x)$

$$P_{из.} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^2 P_{из.i,j} . \quad (4.14)$$

5. Определение показателя надежности изоляции ВЛ

Число отключений линии, полученное по (3.1), является показателем грозоупорности линий, не оснащенных устройствами автоматического повторного включения (АПВ).

При наличии АПВ по выражению (3.1) определяется по существу частота работы выключателей. Допустимое число грозовых отключений, определяющее частоту работы выключателей, зависит от номинального напряжения, типа выключателя, величины отключаемых токов коротких замыканий, длины отключаемых линий. Для воздушных выключателей на напряжение свыше 110 кВ допустимое число грозовых отключений составляет 2 – 8 раз в год. При выполнении этого условия необходимо также обеспечить достаточную надежность электроснабжения, в частности, допустимое число перерывов в электроснабжении. Полное отключение ВЛ может возникнуть вследствие перекрытий изоляции при грозовом поражении ВЛ и последующем включении линии в цикле АПВ. Допустимое число перерывов в электроснабжении в этом случае не должно превышать:

$$N_{дон} = \begin{cases} 0,1 \text{ } \frac{1}{\text{год}} & \text{при отсутствии резервирования} \\ & \text{(для ВЛ до 220 кВ),} \\ 1 \text{ } \frac{1}{\text{год}} & \text{при наличии резервирования} \\ 0,1 \text{ } \frac{1}{\text{год}} & \text{для ВЛ 500 кВ,} \\ 0,05 \text{ } \frac{1}{\text{год}} & \text{для ВЛ 750 кВ,} \\ 0,005 \text{ } \frac{1}{\text{год}} & \text{для ВЛ 1150 кВ,} \end{cases}$$

Ожидаемое число перерывов в электроснабжении для рассматриваемой ВЛ можем быть определено следующим образом:

$$n_{перер.ЭС} = \eta * n_{г.откл.} * P_{УАПВ} * P_{из.}, \quad (5.1)$$

где

η - коэффициент, учитывающий превышение общего числа аварийных отключений ВЛ над грозовыми отключениями (по статистическим данным $\eta=1,25$);

$P_{УАПВ}$ - вероятность потенциально успешного АПВ, т.е. такого АПВ, которое было бы успешным, если бы не произошло перекрытия изоляции при повторном включении, равная

$$P_{\text{уАПВ}} = \begin{cases} 0,54 & \text{для ВЛ 6 - 10 кВ,} \\ 0,7 & \text{для ВЛ 35 кВ,} \\ 0,75 & \text{для ВЛ 110 кВ,} \\ 0,77 & \text{для ВЛ 220 - 330 кВ,} \\ 0,8 & \text{для ВЛ 500 кВ и выше.} \end{cases}$$

Выбранные габариты изоляционных промежутков на опорах ВЛ и система защитных мероприятий считаются удовлетворяющим требованиям надежности, если справедливо соотношение:

$$n_{\text{перп.ЭС}} \leq N_{\text{дон}}. \quad (5.2)$$

В случае, если условие (5.2) не выполняется, необходимо пересмотреть систему защитных мероприятий от перенапряжений.

Литература

1. Справочник по электротехническим установкам высокого напряжения / Под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.: ил.
2. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Г.Н. Александров, В.В. Ершевич, С.В. Крылов и др.; Под ред. Г.Н. Александрова и Л.О. Петерсена. – Л.: Энергоатомиздат Ленингр. отд-ние, 1983 – 368 с.: ил.
3. Мельников Н.А. и др. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330-500 кВ. Под общ. ред. С.С. Рокотяна. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1974. - 472 с. с ил.
4. Руководящие указания по защите от внутренних и грозовых перенапряжений сетей 3-750 кВ (проект). – Труды НИИПТ, вып. 21-22, 1975, 288 с.
5. Правила устройства электроустановок потребителей. М.: Энергосервис, 1999. – 285 с.
6. Правила устройства электроустановок. М.: Главгосэнергонадзор, 1998. – 607 с.