

# 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

## 1.1. Понятие об изоляционных материалах

Электроизоляционными называются диэлектрические материалы, основным назначением которых является устранение возможности протекания электрического тока по путям, не предусмотренным электрической схемой устройства.

Электроизоляционные материалы подразделяются по агрегатному состоянию на газообразные, жидкие, твердые и твердеющие. К твердеющим относятся изоляционные материалы, которые при изготовлении изоляции являются жидкими, а в рабочем состоянии – твердыми (лаки, компаунды).

По химическому составу эти материалы подразделяются на органические, неорганические, элементоорганические.

Под органическими подразумевают соединения углерода, которые содержат также водород, кислород, азот и т. д.

К элементоорганическим изоляционным материалам относятся такие соединения углерода, в состав которых входят неорганические химические элементы (кремний, алюминий, и ряд других).

Свойства электроизоляционных материалов оцениваются по тем же показателям, что и свойства диэлектриков.

## 1.2. Газообразные изоляционные материалы

Газообразные изоляционные материалы широко используются в электротехнике благодаря ряду ценных качеств. Часто их присутствие неизбежно. Так, воздух окружает большинство электротехнических устройств, а в воздушных линиях электропередач является основным изоляционным материалом. В табл. 1.1 приведены основные характеристики наиболее широко используемых на практике газообразных материалов: воздуха, азота, водорода и элегаза ( $\text{SF}_6$ ). Воздух является естественным изоляционным материалом. В реальных условиях всегда содержит некоторое количество водяного пара, который значительно ухудшает изоляционные свойства газа. Азот, обладая практически теми же свойствами, что и воздух, является инертным газом, не вызывающим коррозии металлических частей электротехнических устройств.

Азот обычно применяется при повышенном давлении в кабелях,

конденсаторах и трансформаторах.

Водород, обладая высокими охлаждающими способностями, используется как изоляционный материал в крупных электрических генераторах.

Таблица 1.1

### Основные показатели газообразных изоляционных материалов

Характеристики	Воздух	Азот	Водород	Элегаз
Уд.вес, кг/м <sup>3</sup>	1,29	1,25	0,089	6,7
Относительная диэлектрическая проницаемость	1,00059	1,0058	1,00027	1,0019
Электрическая прочность кВ/мм	3,2	3,2	1,92	7,5
Удельная теплоемкость, кДж/кг К	1,005	1,06	14,5	0,62
Удельная теплопроводность, мВт/м К	24,0	24,0	166	-

Чтобы избежать образования взрывчатой смеси при попадании воздуха, применяется в герметически закрытых машинах и при повышенных давлениях.

Элегаз  $SF_6$  обладает повышенной электрической прочностью, не горюч и нетоксичен. Используется в силовых и измерительных трансформаторах, кабелях и конденсаторах высокого напряжения, выключателях и т. п.

Все без исключения газообразные диэлектрики обладают свойством восстанавливать свои изоляционные свойства после электрического пробоя. Это свойство газов приводит к восстановлению работоспособности устройств через определенный интервал времени после пробоя изоляции.

### 1.3. Жидкие изоляционные материалы

Все жидкие изоляционные материалы можно подразделить на нефтяные (минеральные) масла, синтетические изоляционные, жидкости и растительные масла.

Наибольшее применение в электротехнике нашли нефтяные (минеральные) масла, которые в соответствии с их назначением подразделяются на трансформаторные, кабельные и конденсаторные. Характеристики некоторых жидких изоляционных материалов приведены в табл. 1.2.

**Данные жидких изоляционных материалов**

Характеристики	Трансформаторное масло	Совол	Совтол	ПЭС-Д
Электрическая прочность, кВ/мм	15-20	14 -18	15-20	18
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,0006-0,001	0,002	0,002	0,0003
Относительная диэлектрическая проницаемость	2,1-2,4	5	4,5-4,8	2,4-2,8
Удельное объемное сопротивление, Ом·м	$10^{14}$ - $10^{15}$	$10^{13}$ - $10^{14}$	$10^{13}$ - $10^{14}$	$1,25 \cdot 10^{14}$
Температура вспышки, °С	135	200-230	200-220	150
Температура застывания, °С	-45	-8	-25	-60

Совол и совтол представляют группу синтетических жидких диэлектриков. Не горючи, но сильно токсичны. Используются в конденсаторах с целью увеличения их емкости, т.к. обладают большой относительной диэлектрической проницаемостью. Имеют высокую температуру застывания, что исключает возможность применения совола и совтола при низких температурах.

Кремнийорганический жидкий изоляционный материал ПЭС-Д может быть использован в широком диапазоне температур окружающей среды. Используется для пропитки твердых пористых и слоистых изоляционных материалов с целью повышения нагревостойкости и электрической прочности.

Трансформаторное масло является одним из наиболее широко используемых жидких диэлектриков.

Трансформаторное масло – жидкость от почти бесцветной, до темно-желтого цвета с малой вязкостью. Кинематическая вязкость составляет 17-18,5 мм<sup>2</sup>/с при 20 °С и 6,5-6,7 мм<sup>2</sup>/с при 50 °С; кислотное число 0,03-0,1 г КОН/кг; температура вспышки 135-140 °С; температура застывания – 45 °С. Специальные сорта трансформаторного масла (АТМ-65) имеют еще более низкую температуру застывания до -70°С.

Одной из важных характеристик трансформаторного масла является критическая температура плавучести льда. При температурах более низких, чем критическая температура плавучести льда, плотность жидкого диэлектрика становится больше плотности

льда. Кристаллы льда всплывают на поверхность жидкого диэлектрика и под воздействием электрического поля образуют мостики между электродами, находящимися в масле. Образование мостиков из льдинок снижает электрическую прочность трансформаторного масла  $E_{пр}$ .

Электрическая прочность трансформаторного масла чувствительна к наличию влаги. Причем незначительное количество воды в масле приводит к резкому уменьшению электрической прочности. Капельки влаги втягиваются в места, где напряженность электрического поля наибольшая, и образуют мостики, по которым и происходит пробой. Существенно влияет на электрическую прочность наличие в масле волокнистых примесей.

Так как вода легко попадает из окружающей среды в масло при транспортировке, то перед использованием оно подвергается сушке пропусканием под давлением через фильтровальную бумагу в фильтр-прессах, на центрифугах или путем обработки адсорбентами.

Просушенное трансформаторное масло должно соответствовать нормам электрической прочности, приведенным в табл. 1.3.

Испытание образца на пробой производят с помощью двух, погруженных в масло дисковых электродов с закругленными краями диаметром 25 мм при расстоянии между ними 2,5 мм.

При эксплуатации трансформаторное масло стареет. В нем образуются кислоты и смолы. Кислоты, разрушают твердую изоляцию обмоток и вызывают коррозию соприкасающихся с маслом металлов. Нерастворимые в масле смолы оседают на погруженные в масло части электротехнических устройств в виде слоя ила, что резко ухудшает условия охлаждения их.

Таблица 1.3

**Нормы электрической прочности трансформаторного масла**

Для аппаратов с рабочим напряжением, кВ	Электрическая прочность не менее, кВ/мм	
	сухое масло	масло, находящееся в эксплуатации
6	25	30
35	30	25
110 и 220	40	35
330	50	45

Процесс старения приводит к выделению пузырьков газов, которые могут стать очагами ионизации.

Свойство не выделять пузырьки газов при старении в электри-

ческом поле или даже поглощать их называется газостойкость масла.

Для замедления скорости старения трансформаторное масло подвергается непрерывной регенерации. С этой целью в установках имеются термосифонные фильтры. Масло, проходя через термосифонный фильтр со слоем адсорбента, очищается от влаги и твердых примесей. В масло добавляются специальные вещества, ингибиторы, замедляющие его старение (ионол, амидопирин и другие).

#### **1.4. Твердые и твердеющие изоляционные материалы**

Наиболее многочисленными из изоляционных материалов являются твердые. Их насчитывается несколько тысяч наименований. В связи с этим рассмотрим только некоторые из них.

Изоляционные материалы, изготовленные на основе слюды. Обладают хорошими изоляционными свойствами, особенно когда электрическое поле направлено поперек плоскостей спайности, по которым слюда расщепляется на тонкие пластины, и высокой нагревостойкостью. Из слюды изготавливаются миканиты и микафолии – листовые или рулонные материалы, склеенные из лепестков слюды с помощью клеящего лака или смолы с применением волокнистой подложки из бумаги, ткани или стеклоткани. Миканиты подразделяются по назначению на коллекторные *К*, прокладочные *П*, формовочные *Ф*, гибкие *Г*. Применяются в коллекторах электрических машин, для изоляции нагревательных элементов, изготовления каркасов, катушек, трубок и т. д.

Керамические изоляционные материалы. Изготавливаются на основе глины, образующей в смеси с водой пластичную, способную формоваться массу. При формовке ей придается вид готового изделия. Затем изделие сушится, глазируется и обжигается при высокой температуре (1200-1800 °С). При обжиге керамика приобретает нужные свойства, а глазировка уменьшает ее гигроскопичность.

Важнейшими видами керамики являются фарфор, стеатит, корундовая керамика.

Керамика используется в силовой электротехнике для изготовления изоляторов, конденсаторов и в качестве конструкционных материалов.

Достоинствами керамики являются высокая нагревостойкость,

негорючесть и то, что она не подвержена старению.

К недостатку керамики можно отнести ее пористость, влияющую на механическую и электрическую прочность.

Органические полимерные изоляционные материалы. Эти материалы подразделяются на термопластичные и терморезистивные.

Термопластичные полимерные материалы при низких температурах тверды, но при нагреве размягчаются и легко деформируются. Они растворяются в соответствующих растворителях. Характерной особенностью термопластичных материалов является то, что нагрев до температуры, соответствующей их пластичному состоянию, не вызывает необратимых изменений их свойств.

Терморезистивные полимерные материалы при нагреве претерпевают необратимое изменение свойств. Они, как говорят, запекаются (отверждаются), приобретая значительную механическую прочность и твердость. При этом они теряют свойства растворимости и плавкости.

Примерами термопластичных полимерных материалов являются полиэтилен, полистирол, полипропилен и т.п. Эти материалы чаще всего используются для изоляции кабелей и проводов. Обладают хорошими электрическими свойствами и малой гигроскопичностью.

Из терморезистивных материалов наиболее широкое применение нашли эпоксидные смолы. Обладают хорошими электрическими свойствами, механической прочностью, высокой стойкостью к влажности, высокой нагревостойкостью.

В электротехнике эпоксидные смолы используются для пропитки и заливки изоляции, в качестве связующего в пластмассах и слоистых пластиках.

Электроизоляционные лаки. Это коллоидные растворы смол, битумов, высыхающих масел в летучих растворителях. Различают лаки пропиточные, покровные, клеящие.

Пропиточные лаки применяются для пропитки обмоток электрических машин, трансформаторов. Пропитка превращает обмотку в монолит, что существенно улучшает ее механические и электрические свойства, уменьшает гигроскопичность.

Покровные лаки и эмали используются для получения тонкой поверхностной изоляции обмоточных и монтажных проводов, лакирования листовой электротехнической стали.

Клеящие лаки используются в качестве связующего при

изготовлении миканитов и других изоляционных материалов.

По технологии применения лаки подразделяются на лаки холодной и горячей сушки.

Слоистые пластики – материалы, получаемые склеиванием большого числа слоев основы с помощью связующего. Наиболее распространены: текстолиты (основой является ткань), гетинаксы (основа - бумага), стеклотекстолиты (основа – стеклоткань).

Используются в качестве электроизоляционных и конструкционных материалов (каркасы обмоток электрических машин и трансформаторов, стержней, плат для монтажа электрических схем и т. д.).

Компаунды – не содержащие летучих растворителей смеси смол, битумов, масел. По назначению различают заливочные и пропиточные компаунды.

Заливочные компаунды применяются для заполнения пустот в изоляции, заливки кабельных муфт с целью защиты изоляции от влаги и химически агрессивных веществ.

Пропиточные компаунды используются для пропитки пористой и волокнистой изоляции (бумага, картон, ткань и т. п.). Широкое применение этот вид компаундов нашел в кабельном производстве (для пропитки бумажной изоляции с целью защиты от влаги и повышения электрической прочности).

## **2. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИИ ДВУХЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ»**

### **2.1. Задание на контрольную работу**

Питание электротехнической установки осуществляется с помощью кабельной линии длиной  $l$ . Кабель со свинцовой оболочкой имеет две токопроводящие жилы радиусом  $R$  (Рис. 2.1). В качестве электрической изоляции жил друг от друга и жил от оболочки использована конденсаторная бумага. В пористой структуре диэлектрика имеются капилляры, заполненные воздухом (или жидким диэлектриком). К жилам кабеля приложено переменное напряжение, действующее значение которого  $U$ , частотой  $f$ .

Учитывая, что электрическое поле внутри кабеля однородно требуется определить:

1. При условии, что поры и капилляры полностью заполнены воздухом (сухая изоляция):

- ёмкость между жилами кабеля,  $C_k$ ;
- сопротивление изоляции между жилами кабеля,  $Z_{из}$ ;
- значение тока утечки между жилами кабеля,  $I_y$ ;
- диэлектрические потери в изоляции кабеля,  $P$ ;
- пробивное напряжение изоляции между жилами кабеля,  $U_{пр}$ .

2. При условии, что поры и капилляры полностью заполнены жидким диэлектриком (пропитанная изоляция):

- ёмкость между жилами кабеля,  $C_{кп}$ ;
- сопротивление изоляции между жилами кабеля,  $Z_{изп}$ ;
- значение тока утечки между жилами кабеля,  $I_{уп}$ ;
- диэлектрические потери в изоляции кабеля,  $P_{п}$ ;
- пробивное напряжение изоляции между жилами кабеля,  $U_{прп}$ .

3. Заполнить табл. 2.2 сравнительных данных кабелей без пропитки и с пропиткой.

4. Анализ влияния пропитки изоляции кабеля на его электрические свойства, (при анализе необходимо указывать, как влияет пропитка изоляции на значение каждого из рассчитанных параметров с использованием теоретических сведений).

5. Вывод о соответствии изоляции пропитанного и непропитанного кабелей требованиям, предъявляемых к кабельной линии правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

Геометрические размеры кабеля и электрические параметры диэлектриков, использованных в качестве изоляции, приведены в табл. 2.1.



Таблица 2.1

## Исходные данные для решения контрольной работы

Номер варианта	Длина линии, $l$ , м	Радиус жилы, $R$ , мм	Расстояние между жилами, $S$ , мм	Рабочее напряжение, $U$ , В	Частота, $f$ , Гц	Плотность		Относительная диэлектрическая проницаемость			Тангенс угла диэлектрических потерь			Электрическая прочность		
						Целлюлозы, $D_1$ , кг/м <sup>3</sup>	Бумаги, $D_2$ , кг/м <sup>3</sup>	Целлюлозы, $\epsilon_{r1}$	Воздуха, $\epsilon_{r2}$	Пропитки, $\epsilon_{r3}$	Целлюлозы, $\text{tg}\delta_1$ , $10^{-4}$	Воздуха, $\text{tg}\delta_2$ , $10^{-6}$	Пропитки, $\text{tg}\delta_3$ , $10^{-3}$	Целлюлозы, $E_{пр1}$ , кВ/мм	Воздуха, $E_{пр2}$ , кВ/мм	Пропитки, $E_{пр3}$ , кВ/мм
0	120	1,38	7,5	220	50	1550	780	6,6	1,00059	2,1	65,0	4,0	3,0	15,0	3,2	20,0
1	50	1,78	8,3	380	50	1550	850	6,6	1,00059	2,7	65,0	4,0	10,0	15,0	3,2	60,0
2	1000	2,25	12,24	2200	50	1550	1100	6,6	1,00059	4,5	65,0	4,0	25,0	15,0	3,2	50,0
3	800	2,82	13,58	1100	50	1550	1090	6,6	1,00059	4,1	65,0	4,0	15,0	15,0	3,2	55,0
4	150	3,34	17,92	6600	50	1550	780	6,6	1,00059	2,8	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	43,0
5	1500	3,99	19,42	3300	50	1550	770	6,6	1,00059	5,2	65,0	4,0	30,0	15,0	3,2	35,0
6	3000	4,72	14,18	6600	50	1550	900	6,6	1,00059	4,8	65,0	4,0	5,0	15,0	3,2	20,0
7	500	5,5	15,74	380	50	1550	970	6,6	1,00059	2,4	65,0	4,0	3,0	15,0	3,2	18,0
8	250	6,18	19,5	2200	50	1550	800	6,6	1,00059	1,01	65,0	4,0	4,0	15,0	3,2	20,0
9	2000	6,91	20,76	1100	50	1550	1100	6,6	1,00059	3,8	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	45,0
10	200	7,68	24,8	3300	50	1550	1100	6,6	1,00059	2,1	65,0	4,0	3,0	15,0	3,2	20,0
11	4000	8,74	27,3	6600	50	1550	850	6,6	1,00059	2,3	65,0	4,0	1,0	15,0	3,2	18,0
12	3500	1,38	11,2	1100	50	1550	780	6,6	1,00059	5,0	65,0	4,0	20,0	15,0	3,2	42,0
13	1600	1,78	11,2	2200	50	1550	900	6,6	1,00059	4,4	65,0	4,0	5,0	15,0	3,2	45,0
14	600	7,68	20,1	220	50	1550	770	6,6	1,00059	2,8	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	24,0
15	800	8,74	22,2	660	50	1550	970	6,6	1,00059	4,8	65,0	4,0	8,0	15,0	3,2	25,0
16	300	2,25	16,14	3300	50	1550	1090	6,6	1,00059	2,7	65,0	4,0	10,0	15,0	3,2	25,0
17	1400	3,34	17,92	6600	50	1550	780	6,6	1,00059	1,019	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	50,0
18	700	6,18	17,1	660	50	1550	780	6,6	1,00059	3,8	65,0	4,0	20,0	15,0	3,2	32,0

## 2.2. Методические указания по выполнению контрольной работы

### 1. Вычисление электрических параметров линии, в кабеле которой в качестве изоляции использована непропитанная конденсаторная бумага.

Конденсаторная бумага представляет собой механическую смесь целлюлозы и воздуха с неодинаковой относительной диэлектрической проницаемостью. Определение относительной диэлектрической проницаемости такого диэлектрика производится в соответствии с уравнением Лихтенеккера (2.1) для последовательного расположения компонентов.

$$\frac{1}{\varepsilon_r} = \frac{\theta_1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{\theta_2}{\varepsilon_{r2}}, \quad (2.1)$$

где объемную концентрацию целлюлозы и воздуха определяют в соответствии с уравнениями

$$\theta_1 = \frac{D}{D_1}; \quad (2.2)$$

$$\theta_2 = 1 - \frac{D}{D_1}, \quad (2.3)$$

где  $\theta_1$  – объемная концентрация целлюлозы;  $\theta_2$  – объемная концентрация воздуха;  $D$  – плотность конденсаторной бумаги, кг/м<sup>3</sup>;  $D_1$  – плотность целлюлозы, кг/м<sup>3</sup>.

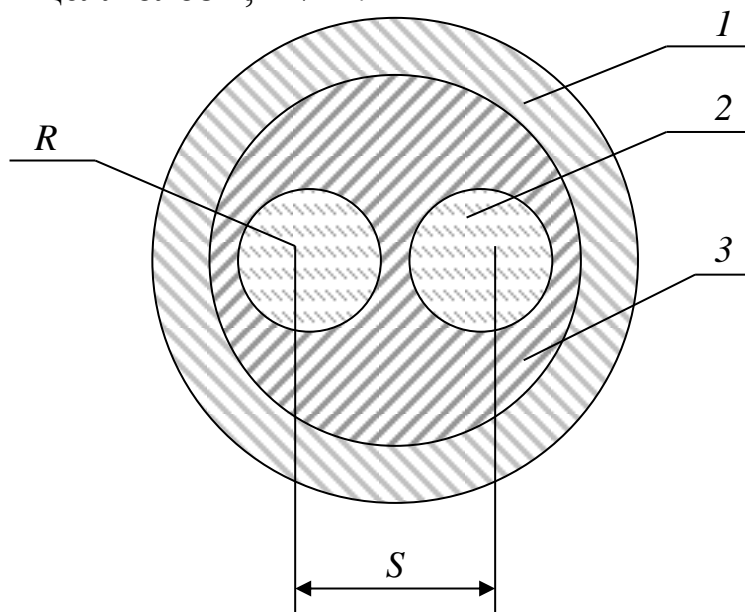


Рис. 2.1. Сечение двухжильного кабеля  
1- оплетка кабеля; 2- жила кабеля; 3- изоляция кабеля

По вычисленному значению относительной диэлектрической проницаемости непропитанной конденсаторной бумаги и заданным геометрическим размерам кабеля рассчитывается ёмкость кабельной линии.

Для двухжильного кабеля ёмкость между жилами может быть определена из уравнения:

$$C_K = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \times \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln K^2}, \Phi, \quad (2.4)$$

где

$$K = \frac{a + x - R}{a + R - x};$$

$$x = \frac{S}{2};$$

$$a = \sqrt{\left(\frac{S}{2}\right)^2 - R^2};$$

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $S$  – расстояние между центрами жил кабеля, м;  $R$  – радиус жил кабеля, м;  $l$  – длина кабельной линии, м.

Тангенс угла диэлектрических потерь конденсаторной бумаги вычисляются по заданным значениям тангенсов углов диэлектрических потерь целлюлозы и воздуха по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{1 + \frac{\theta_2 \cdot \varepsilon_{r1}}{(1 - \theta_2) \cdot \varepsilon_{r2}}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{1 + \frac{(1 - \theta_2) \cdot \varepsilon_{r2}}{\theta_2 \cdot \varepsilon_{r1}}}. \quad (2.5)$$

Удельная активная ( $\gamma_a$ ) и удельная реактивная ( $\gamma_p$ ) проводимости изоляции в переменном электрическом поле с частотой  $f$  вычисляются по формулам

$$\gamma_a = \frac{\varepsilon_r \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}}, \text{ См/м}; \quad (2.6)$$

$$\gamma_p = \frac{\varepsilon_r \cdot f}{1,8 \cdot 10^{10}}, \text{ См/м}. \quad (2.7)$$

Удельная полная проводимость изоляции кабеля связана с удельными активной и реактивной проводимостями соотношением

$$\gamma_{\text{из}} = \sqrt{\gamma_a^2 + \gamma_p^2}, \text{ См/м}. \quad (2.8)$$

Полная проводимость  $Y_{\text{из}}$  изоляции кабеля определяется по удельной проводимости и геометрическим размерам кабеля

$$Y_{\text{из}} = \gamma_{\text{из}} \frac{2 \pi \cdot l}{\ln K^2}, \text{ См}. \quad (2.9)$$

Ток утечки кабеля, возникающий под воздействием приложенного напряжения, сопротивление изоляции между жилами в двухжильных кабелях рассчитываются на основании соотношений

$$I_y = U \cdot Y_{из}, \text{ А}; \quad (2.10)$$

$$Z_{из} = \frac{1}{Y_{из}}, \text{ Ом}. \quad (2.11)$$

Диэлектрические потери в изоляции кабеля  $P$  находятся по действующему значению приложенного переменного напряжения, ёмкости кабельной линии, тангенсу угла диэлектрических потерь и частоте питающей сети

$$P = U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_K \cdot \text{tg}\delta, \text{ Вт}, \quad (2.12)$$

где  $U$  – рабочее напряжение кабельной линии, В;  $f$  – частота, Гц;  $C_K$  – ёмкость кабельной линии, Ф;  $\text{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $P$  – диэлектрические потери, Вт.

Для упрощения расчёта величины пробивного напряжения делаем допущение, что электрическое поле внутри кабеля однородное, то есть напряженность поля в любой его точке одинакова. Тогда электрическая прочность конденсаторной бумаги может быть получена по заданным значениям электрической прочности компонентов (целлюлозы и воздуха) из следующего уравнения

$$E_{пр} = \frac{E_{пр1} \cdot E_{пр2}}{E_{пр1} + E_{пр2} \cdot \left(1 - \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}\right)}, \text{ кВ/мм}. \quad (2.13)$$

Пробивное напряжение изоляции:

$$U_{пр} = E_{пр} \cdot h_{из}, \text{ кВ}. \quad (2.14)$$

где  $h_{из}$  – минимальная толщина изоляции, мм.

Минимальная толщина изоляции между жилами кабеля для двухжильного кабеля определяется из уравнения

$$h_{из} = S - 2R. \quad (2.15)$$

**2. Вычисление электрических параметров линии, при условии, что оболочка кабеля заполнена жидким изоляционным материалом.**

Последовательность расчёта остается той же, что и для непроспитанной конденсаторной бумаги. Основные формулы для расчета:

При расчёте следует полагать, что объёмные концентрации целлюлозы и заменяющего воздух жидкого диэлектрика остались такими же, как целлюлозы и воздуха, то есть

$$\theta_2 = \theta_3.$$

Относительная диэлектрическая проницаемость

$$\frac{1}{\varepsilon_r} = \frac{\theta_1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{\theta_3}{\varepsilon_{r3}}. \quad (2.16)$$

Емкость между жилами

$$C_{КП} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \times \frac{2\pi \cdot l}{\ln K^2}. \quad (2.17)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь конденсаторной бумаги

$$\operatorname{tg} \delta_{\Pi} = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{1 + \frac{\theta_3 \cdot \varepsilon_{r1}}{(1 - \theta_3) \cdot \varepsilon_{r3}}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_3}{1 + \frac{(1 - \theta_3) \cdot \varepsilon_{r3}}{\theta_3 \cdot \varepsilon_{r1}}}. \quad (2.18)$$

Удельная полная проводимость изоляции кабеля, См/м

$$\gamma_{\text{изп}} = \sqrt{\gamma_a^2 + \gamma_p^2}. \quad (2.19)$$

Полная проводимость изоляции кабеля, См

$$Y_{\text{изп}} = \gamma_{\text{изп}} \frac{2\pi \cdot l}{\ln K^2}. \quad (2.20)$$

Ток утечки кабеля, А

$$I_{\text{уп}} = U \cdot Y_{\text{изп}}. \quad (2.21)$$

Сопротивление изоляции между жилами в двухжильных кабелях, Ом

$$Z_{\text{изп}} = \frac{1}{Y_{\text{из}}}. \quad (2.22)$$

Диэлектрические потери в изоляции кабеля, Вт

$$P_{\Pi} = U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_{КП} \cdot \operatorname{tg} \delta_{\Pi}. \quad (2.23)$$

Электрическая прочность конденсаторной бумаги, кВ/мм

$$E_{\text{прп}} = \frac{E_{\text{пр1}} \cdot E_{\text{пр3}}}{E_{\text{пр1}} + E_{\text{пр3}} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{r3}}{\varepsilon_{r1}}\right)}. \quad (2.24)$$

Пробивное напряжение изоляции, кВ

$$U_{\text{прп}} = E_{\text{прп}} \cdot h_{\text{из}}, \quad (2.25)$$

После окончания расчёта следует **обязательно** проанализировать, как влияет на электрические параметры кабельной линии пропитка её изоляции жидким диэлектриком. Для удобства анализа необходимо составить таблицу расчётных значений электрических параметров кабельной линии до и после пропитки. Образец такой таблицы представлен ниже.

**Таблица сравнительных данных кабельной линии**

Обозначение параметра	$\epsilon_r$	$C_K, \Phi$	$\gamma_{из}, \text{СМ/М}$	$Z_{из}, \text{ОМ}$	$Y_{из}, \text{СМ}$	$P, \text{Вт}$	$U_{пр}, \text{кВ}$
Кабель без пропитки							
Обозначение параметра	$\epsilon_r$	$C_{Кп}, \Phi$	$\gamma_{изп}, \text{СМ/М}$	$Z_{изп}, \text{ОМ}$	$Y_{изп}, \text{СМ}$	$P_{п}, \text{Вт}$	$U_{прп}, \text{кВ}$
Кабель с пропиткой							

При анализе необходимо указывать, как влияет пропитка изоляции на значение каждого из рассчитанных параметров с использованием теоретических сведений.

В конце анализа необходимо сделать вывод о соответствии изоляции пропитанного и непропитанного кабелей требованиям, предъявляемых к кабельной линии правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

В соответствии с этими требованиями кабельные линии с рабочим напряжением до 1000 В должны обладать сопротивлением изоляции  $R_{из} > 0,5 \text{ МОм}$  при прозвонке их мегаомметром на напряжение 2,5 кВ.

Изоляция кабельных линий с рабочим напряжением более 1 кВ должна выдерживать воздействия постоянных напряжений, значение которых приводятся в табл. 2.3.

Таблица 2.3

### **Испытательное напряжение выпрямленного тока для силовых кабелей**

Изоляция	Напряжение, кВ, для кабелей на рабочее напряжение, кВ								Продолжительность
	2	3	6	10	20	35	110	220	
Бумажная	12	18	36	60	100	175	300	450	

Для установления соответствия изоляции кабельных линий с рабочим напряжением до 1 кВ требованиям ПУЭ необходимо рассчитать сопротивление изоляции  $R_{из}$  постоянному току. Расчёт  $R_{из}$  осуществляется по активной удельной проводимости в соответствии с уравнениями

Активная проводимость кабельной линии

$$g_{\text{из}} = \gamma_a \cdot \frac{2\pi \cdot l}{\ln K^2}, \text{ См.} \quad (2.26)$$

где  $\gamma_a$  – удельная активная проводимость кабельной линии, См/м.

Сопротивление изоляции постоянному току

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{g_{\text{из}}}, \text{ Ом.} \quad (2.27)$$

Если рассчитанное значение сопротивления изоляции  $R_{\text{из}}$  больше 0,5 мОм, то конденсаторная линия удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Для кабельных линий с рабочим напряжением свыше 1000 В проверка изоляции на соответствие требованиям ПУЭ производится путём сравнения рассчитанного пробивного напряжения с  $U_{\text{пр}}$  с испытательным напряжением, приведённым в табл. 2.3.

### 2.3. Методические указания по оформлению контрольной работы

Контрольная работа состоит из девятнадцати вариантов с нумерацией вариантов от 0 до 18.

Номер варианта задачи, решаемой студентами в контрольной работе, определяется суммой двух последних цифр шифра студента. Например, если номер шифра студента 4298, то номер варианта задачи – 17.

Контрольная работа состоит из титульного листа и основной части. На титульном листе указывается наименование вуза, факультета и кафедры, название контрольной работы; группа, фамилия студента и дата выполнения работы; фамилия преподавателя. В основную часть должны быть включены:

1. Название контрольной работы;
2. Сечение двужильного кабеля, рис. 2.1.
3. Вычисления электрических параметров линии, в кабеле которой в качестве изоляции использована непропитанная конденсаторная бумага.
4. Вычисления электрических параметров линии, при условии, что оболочка кабеля заполнена жидким изоляционным материалом.
5. Таблица 2.2 сравнительных данных кабелей без пропитки и с пропиткой.

6. Анализ влияния пропитки изоляции кабеля на его электрические свойства, (при анализе необходимо указывать, как влияет пропитка изоляции на значение каждого из рассчитанных параметров с использованием теоретических сведений).

7. Вывод о соответствии изоляции пропитанного и непропитанного кабелей требованиям, предъявляемых к кабельной линии правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

8. Индивидуальное теоретическое задание. Номер теоретического задания, а именно вопроса, преподаватель выдает студенту индивидуально. Студент в конце работы, после выводов, дает ответ на этот вопрос.

### **3. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ**

1. Отличие изоляционного материала от диэлектрика.
2. Изоляция электротехнических установок.
3. Отличие внутренней изоляции от внешней.
4. Кратковременная и длительная электрическая прочность.
5. Виды изоляции в трансформаторах и электрических машинах.

Их значение.

6. Требования к внутренней изоляции.
7. Емкость плоского вакуумного конденсатора и емкость конденсатора тех же размеров с диэлектриком.
8. Материалы для изоляторов.
9. Линейные изоляторы.
10. Аппаратные изоляторы.
11. Поляризация. Параметры поляризации.
12. Изоляция конденсаторов.
13. Изоляция силовых кабелей.
14. Изоляция силовых трансформаторов.
15. Изоляция масляных, вакуумных и воздушных выключателей.
16. Изоляция вращающихся электрических машин.
17. Оксидная изоляция.
18. Виды поляризации и их особенности.



19. Расчет электроизоляционных конструкций. Координация изоляции.
20. Метод «емкость – температура».
21. Метод «емкость – частота».
22. Зависимость  $\epsilon_r$  при электронной и ионной поляризации от температуры и частоты.
23. Зависимость  $\epsilon_r$  при дипольной поляризации от температуры и частоты.
24. Возникновение частичных разрядов.
25. Методы контроля изоляции с использованием явления абсорбции.
26. Ионизационная кривая.
27. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости.