

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Утверждаю  
Зав. каф. ЭЭС  
доцент, канд. техн. наук  
Ю. С. Боровиков  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **РАСЧЕТ ВВОДОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

Учебное пособие к курсовому проектированию по дисциплине «Изоляция электро-  
технического оборудования высокого напряжения» для бакалавров по направлению  
140400 «Электроэнергетика и электротехника»

Томск - 2012

УДК 621.315

Расчет вводов высокого напряжения и силовых конденсаторов. Учебное пособие к курсовому проектированию по дисциплине «Изоляция электротехнического оборудования высокого напряжения» для бакалавров по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника». – Томск: Издательство ТПУ, 2012. – 76 с.

Составитель – доцент кафедры ЭЭС, канд. техн. наук, Г. Е. Куртенков

Рецензент – профессор, доктор техн. наук, В. И. Курец

Учебное пособие к курсовому проектированию рассмотрено и рекомендовано к изданию методическим семинаром кафедры электроэнергетических систем « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

Зав. каф. ЭЭС  
доцент, канд. техн. наук

Ю. С. Боровиков

## В В Е Д Е Н И Е

Проходные изоляторы (вводы) служат для изолирования и механического крепления токоведущих частей, проходящих через стены распределительных устройств, перегородки, сквозь заземленные крышки различных аппаратов и т.д. Поэтому проходные изоляторы должны иметь высокую электрическую и механическую прочность и обеспечивать пропускание тока заданной величины. Они предназначены для работы при температурах окружающего воздуха от  $-45$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , а в тропическом исполнении — при температурах от  $-10$  до  $+55^{\circ}\text{C}$ .

Высоковольтные проходные изоляторы, предназначенные для работы при напряжении выше 35 кВ, называют вводами.

Силовые конденсаторы широко применяются в электроэнергетике для улучшения коэффициента мощности, в импульсной технике и ядерных исследованиях, в схемах выпрямления, в установках электроимпульсной и электрогидравлической технологии и т.д.

Как правило, эти конденсаторы работают в условиях воздействия высокого напряжения, что требует тщательного подхода к выбору электроизоляционных материалов и рабочей напряженности с учетом воздействия многочисленных факторов, определяющих долговечность и надежность конденсаторов.

Курсовой проект по изоляции установок высокого напряжения призван систематизировать и закрепить знания, полученные при изучении ряда общеинженерных и специальных курсов, выработать навыки самостоятельного решения практических инженерных задач по профилю будущей специальности.

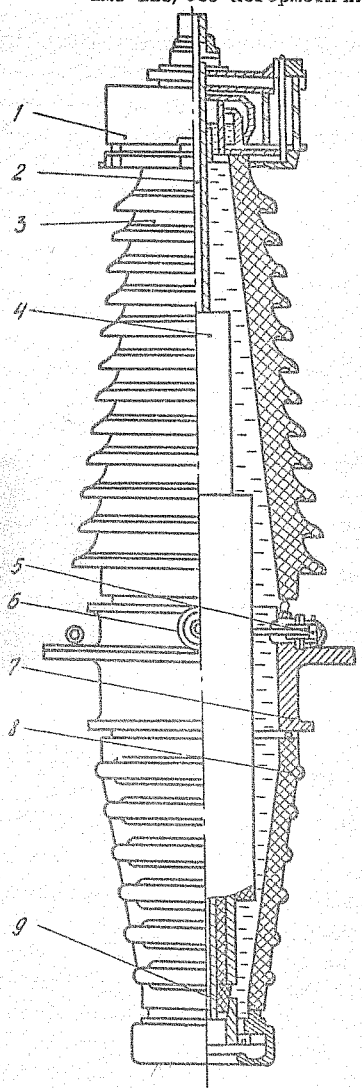
### 1. РАСЧЕТ КОНДЕНСАТОРНЫХ ВВОДОВ С БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

#### 1.1. Краткие сведения о конструктивном исполнении вводов

В электроэнергетике наибольшее распространение получили вводы конденсаторного типа с бумажно-масляной изоляцией.

Ввод конденсаторного типа (рис.1.1) представляет из себя цилиндрическое веретенообразное тело, на токоведущий стержень (трубу) которого наматывается кабельная бумага марки КВ-120 шириной 100-150 мм по способу спиральной намотки с положительным перекрытием. В данном случае сердечник ввода может быть изготовлен любой длины. Возможна намотка остова ввода с рулона, при этом длина сердечника

Конденсаторный бумажно-масляный ввод типа  
БМТ-110/630 негерметичного исполнения



- 1 - расширитель с гидро-
- затвором;
- 2 - токоведущая
- труба;
- 3 - верхняя покрыв-
- ка;
- 4 - изоляционный ос-
- тов;
- 5 - измерительный
- ввод;
- 6 - маслоотборник;
- 7 - соединительная втул-
- ка;
- 8 - нижняя покрывка;
- 9 - стакан

Рис. I. I

ограничивается обычно шириной рулонов, выпускаемых бумажной промышленностью (порядка 3,5 м). Для выравнивания поля в радиальном и аксиальном направлениях через определенные промежутки между слоями бумаги помещаются конденсаторные обкладки из перфорированной алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм. После намотки бумага срезается несколькими уступами в нижней и верхней части сердечника. Затем остов ввода подвергается тщательной вакуумной сушке с последующей пропиткой очищенным и дегазированным трансформаторным маслом.

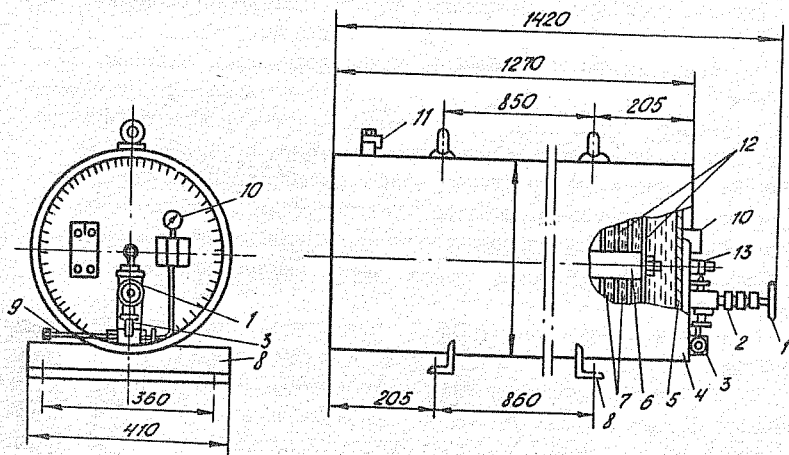
Изоляционный остов помещается внутрь фарфоровой покрышки. Толщина стенки фарфора зависит от диаметра и массы изолятора и определяется суммарными механическими нагрузками, которые воздействуют на изолятор в эксплуатации. Обычно толщина фарфора не превышает 30-50 мм. Между изоляционным остовом ввода и внутренней поверхностью фарфоровой покрышки имеется зазор для циркуляции масла, а также для обеспечения возможности сборки изолятора. Толщина зазора в области среднего фланца (основание воздушной части ввода) составляет 15-25 мм.

В верхней части ввода (рис. I.1) крепится маслорасширитель с указателем уровня масла, гидрозатвором и воздухоосушителем.

Современные конструкции вводов выполняются герметичными, что позволяет избежать увлажнения и окисления масла атмосферным воздухом. Такие вводы имеют встроенные (вводы 110-220 кВ) или выносные (вводы 220 кВ и выше) баки давления (компенсаторы), которые соединяются медным трубопроводом длиной 3-6 м с внутренней полостью ввода. В баке давления (рис. I.2) помещены пустотелые коробки цилиндрической формы (сильфоны), заполненные азотом под давлением 0,025 МПа (0,25 кгс/см<sup>2</sup>) при  $t = 20^{\circ}\text{C}$ . Компенсатор ввода на 500 кВ имеет 76 сильфонов. При расширении масла во вводе от нагревания часть его по трубопроводу переместится в бак давления (сильфоны сожмутся). При охлаждении масла во вводе объем его уменьшится, и масло из конденсатора под давлением азота в расширяющихся сильфонах будет перетекать во ввод. Количество масла, которое может перейти из ввода в компенсатор и обратно, для вводов на 500 кВ составляет 75-85 л. Герметичные вводы не имеют расширителей с гидравлическими затворами, т.к. их роль выполняют баки давления (компенсаторы).

В бумажно-масляных конденсаторных вводах обычно применяется бесфланцевое крепление покрышек (рис. I.1) путем стяжки всей конструкции на токоведущем стержне ввода с помощью пружин, расположенных в верхней части ввода, и специальных нажимных гаек. Стягивающие пружины должны создавать такое усилие, чтобы ввод не имел смещений фар-

Выносной бак давления (компенсатор) для герметичного  
ввода на 500 кВ



1 - маховик; 2 - вентиль; 3 - переходник; 4 - корпус  
бака; 5 - крышка; 6 - направляющая планка; 7 - сифоны;  
8 - опоры; 9 - трубопровод; 10 - манометр; 11 - патрубок  
с пробкой; 12 - алюминиевая прокладка (диск); 13 -  
патрубок

Рис. I.2

фора относительно стержня и других смещений при транспортировке, монтаже и т.д. Между фарфоровой крышкой и металлическими деталями помещаются прокладки из маслостойкой резины для обеспечения герметичности конструкции ввода.

Некоторые маслонаполненные вводы снабжены приспособлением для измерения напряжения (ПИН). Для присоединения ПИН используются две уравнительные обкладки сердечника - последняя заземленная, и предпоследняя, которая присоединяется к выводу ПИН. Эти две обкладки ввода образуют низковольтное плечо емкостного делителя. В современных конструкциях вводов вывод для присоединения ПИН может быть использован для измерения  $U_{\phi}$  и емкости ввода.

Высоковольтный ввод имеет следующие конструктивные элементы (основные):

1. Токосводящий стержень или трубу из меди, являющуюся токоведущим элементом у аппаратных или линейных вводов. Трансформаторные вводы отличаются тем, что внутри трубы проходит кабель от высоковольтной обмотки трансформатора, причем жила кабеля припаяна к наколичку ввода (кабельные вводы).

2. Верхнюю фарфоровую крышку конической или цилиндрической формы с несобходимым числом ребер, обеспечивающих требуемую величину мокроразрядного напряжения. По конструктивному исполнению фарфоровые крышки маслонаполненных вводов могут быть сплошными (преимущественно вводы на 110 кВ) и составными. Составная крышка (обычно верхняя) состоит из двух частей, стыки между которыми уплотняются маслостойкой резиной или склеиваются эпоксидной смолой. Усилие, необходимое для сжатия составных частей крышки, обеспечивается стяжным устройством.

3. Маслорасширитель или компенсатор, предназначенный для компенсации объема масла во вводе при изменении токовых нагрузок или температуры окружающей среды. При изменении температуры в трансформаторных маслонаполненных вводах от  $-45$  (минимальная) до  $+95^{\circ}\text{C}$  (максимальная) полный объем масла в расширителе составит около 10% общего объема масла во вводе.

4. Металлическую соединительную втулку, которая служит для соединения верхней и нижней частей ввода. Для крепления ввода к корпусу оборудования или к строительной конструкции здания втулка имеет фланец. Соединительные втулки ранее изготавливались из стали или серого чугуна, в настоящее время они выполняются из алюминиевых сплавов методом литья или сварки. На втулке размещаются измерительные трансформаторы тока.

5. Нижнюю фарфоровую покрывку, помещаемую в бак трансформатора или выключателя. Она находится в масле, поэтому имеет меньшую длину и менее развитые ребра. Линейные вводы имеют обычно верхнюю и нижнюю покрывки одинаковой длины.

Нижняя часть трансформаторного ввода имеет металлический экран для выравнивания электрического поля у края ввода. Вводы на 500 кВ и выше на маслорасширителях имеют экраны из металлических прутков для устранения короны и повышения разрядных характеристик.

Для контроля качества масла вводы имеют маслоотборное устройство, расположенное на соединительной втулке. Попадание незначительного количества влаги внутрь ввода приводит к резкому снижению электроизоляционных свойств изолятора. Поэтому на заводах при изготовлении вводов принимаются тщательные меры по обеспечению их высокой электрической прочности.

При маркировке бумажно-масляных конденсаторных вводов используются следующие обозначения: Г - герметичное исполнение (негерметичное исполнение в обозначении не указывается); БМ - бумажно-масляная изоляция; Т - для силовых трансформаторов и реакторов; В - для масляных выключателей; Л - линейный ввод (для прохода через стены);

У - усиленная наружная изоляция; П - ввод с приспособлением для измерения напряжения (ПИН); 0 + 30, 0 + 45, 0 + 60, 0 + 90 - предельные углы отклонения ввода от вертикали при монтаже и эксплуатации.

Например,  $\frac{\text{ГБМВУ}}{\text{0-15}}$  - 220/2000-У1, расшифровывается следующим образом: герметичный с бумажно-масляной изоляцией, для выключателей, с усиленной наружной изоляцией, номинальное напряжение 220 кВ, номинальный ток 2000А, для районов с умеренным климатом (исполнение У1). Механическая прочность вводов в обозначении не указывается. При монтаже (эксплуатации) ввод может отклоняться от вертикали на угол от 0 до 15°.

## 1.2. Электрический расчет ввода

Электрический расчет вводов с конденсаторной бумажно-масляной изоляцией заключается в выборе радиальной напряженности поля в изоляции и определении геометрических размеров выравнивающих обкладок. При этом рабочие градиенты в изоляции определяются, как правило, ее ионизационными характеристиками.

Основной расчет вводов является максимальный расчетный градиент  $E_{\text{max}}$ . Рабочая напряженность поля устанавливается ниже напряженности начальной ионизации, а испытательная - ниже напряженнос-



ти критической ионизации. При этом для слабонеоднородного поля и при защищенных краях конденсаторных обкладок при рабочем режиме обычно берут  $E_{\text{раб}} \leq 5$  кВ/мм, а при испытательном -  $E_{\text{исп}} \leq 18$  кВ/мм.

Для обычных обкладок (с закрытыми краями) без специальных методов защиты соответственно  $E_{\text{раб}} = 3,6 d^{-0,58}$ , кВ/мм и  $E_{\text{исп}} = 12 d^{-0,58}$ , кВ/мм, где  $d$  - толщина слоя изоляции между обкладками в мм. При открытом крае обкладок, находящихся в объеме масла, условия для возникновения ионизационных процессов облегчаются. Поэтому значения напряженностей  $E_{\text{раб}}$  рекомендуется уменьшать приблизительно в 1,5 раза, значение напряженности  $E_{\text{исп}}$  остается практически неизменным.

При выборе радиальных градиентов следует помнить, что с уменьшением толщины слоя изоляции напряженность начальной и критической ионизации возрастает, а пробивная напряженность при толщинах, меньших оптимальных, падает из-за наличия дефектов в изоляции. Поэтому на практике используются оптимальные толщины изоляции между манжетами 1-2 мм при намотке кабельной бумаги толщиной 0,08+0,12 мм. Число манжет может быть от 2 до 5. При этом толщина слоя между основными конденсаторными обкладками лежит в пределах 3-6 мм.

Практически наибольшая допустимая напряженность электрического поля в сердечнике с бумажно-масляной изоляцией в радиальном направлении принимается при рабочем напряжении обычно 3,5 + 4,0 кВ/мм, а при испытательном - 9-10 кВ/мм. Электрическая прочность аппаратной бумажно-масляной изоляции при переменном напряжении составляет 30-40 кВ/мм.

Тогда допустимая расчетная максимальная напряженность при рабочем режиме

$$[E_{\text{max}}] = E_{\text{раб}} \frac{U_{\text{расч}}}{U_{\text{раб}}}, \quad (1.1)$$

где  $U_{\text{раб}} = \frac{(1,1 \div 1,15) U_{\text{H}}}{\sqrt{3}}$  - наибольшее рабочее напряжение

для систем с глухим заземлением нейтрали ( $U_{\text{H}} \geq 110$  кВ);

$U_{\text{раб}} = (1,1-1,15) U_{\text{H}}$  - наибольшее рабочее напряжение для систем с изолированной нейтралью ( $U_{\text{H}} \leq 35$  кВ).

Электрическая прочность изоляционного остова будет достаточна, если максимальная напряженность в изоляции будет меньше допустимой напряженности, т.е.  $E_{\text{max}} \leq [E_{\text{max}}]$ .

### 1.2.1. Выбор расчетных напряжений и напряженностей.

Рассмотрим расчет конденсаторного ввода при условии постоянства осевого (аксиального) градиента  $E_L$  при постоянстве уступов  $\Delta l$ , что позволяет сократить длину изолятора. В этом случае при выполнении условия постоянства емкости между соседними обкладками ( $C = const$ ) наибольший рабочий градиент  $E_{L\text{ раб}}$  в каждом слое будет различен при различной толщине изоляционного слоя  $d$  ( $\Delta r$ ). Этот метод нашел наибольшее распространение при расчете и конструировании вводов с бумажно-масляной изоляцией.

Исходными данными для расчета ввода являются: номинальное напряжение  $U_N$ , номинальный ток  $I_N$ , механическая нагрузка  $P_{изг}$ , условия эксплуатации. С учетом заданного  $U_N$  в соответствии с ГОСТ 1516.1-76 и ГОСТ 206.90-75 определяются суховыдерживаемое  $U_{схв}$  и мокровыдерживаемое  $U_{мв}$  напряжение при 50 Гц, а также выдерживаемые напряжения при воздействии полной и срезанной импульсной волны  $U_{имп}$  и  $U_{имп ср}$  (табл. I.1, I.2).

При расчете внутренней изоляции ввода за  $U_{расч}$  принимается величина, равная I, I  $U_{схв}$ .

Допустимая аксиальная составляющая напряженности электрического поля выбирается из условия отсутствия разряда вдоль уступов изоляционного остова. При этом аксиальная разрядная напряженность вдоль поверхности диэлектрика в воздухе  $E_{ЛВ}$  примерно в 2 раза меньше аксиальной разрядной напряженности в масле  $E_{ЛМ}$ .

Приведенная аксиальная напряженность поля

$$\frac{1}{E_L} = \frac{1}{E_{ЛВ}} + \frac{1}{E_{ЛМ}} \quad (I.2)$$

В реальных конструкциях вводов аксиальная напряженность в воздухе  $E_{ЛВ} = 4,8 \div 5,4$  кВ/см, а в масле -  $E_{ЛМ} = 8,7 \div 10$  кВ/см.

По известным значениям  $U_{схв}$ ,  $U_{мв}$ ,  $U_{имп}$  предварительно находят сухоразрядное расстояние воздушной части изолятора  $l_{схр}$  и выбирают наибольшее значение.

При приложении напряжения в сухом состоянии  $l_{схр} = U_{схв} / E_{схр}$ , под дождем -  $l_{схр} = U_{мв} / E_d$ , на импульсах -  $l_{схр} = U_{имп} / E_{имп}$ , где

средние разрядные напряженности принимают:  $E_{схр} = 3,3 \div 4,3$  кВ/см;  $E_d = 2,3-2,6$  кВ/см. Для полной волны  $E_{имп} = 5,2-6,0$  кВ/см, для срезанной -  $E_{имп} = 7,4 \div 9,0$  кВ/см.

Высота верхней фарфоровой крышки ввода  $H_{фв}$  для наружной

Таблица 1.1

Нормированные испытательные кратковременные напряжения промышленной частоты для изоляторов (действующие значения, кВ)

Класс напряжения, кВ	Наибольшее рабочее напряжение (линейное), кВ	Испытательное однофазное напряжение внутренней изоляции вводов, кВ	Испытательное напряжение при плавном подъеме, кВ		Примечание
			внешняя изоляция		
			в сухом состоянии	под дождем	
35	40,5	95	110	85	ГОСТ 1516.1-76
110	126,0	265	295	215	
150	172,0	340	375	290	
220	252,0	490	550	425	
330	363,0	630	700	550	
500	525,0	800	900	740	
750	787,0	950	1050	900	ГОСТ 206.90-75

Таблица 1.2

Нормированные испытательные напряжения грозовых импульсов для изоляторов (максимальное значение, кВ)

Класс напряжения, кВ	Наибольшее рабочее напряжение (линейное), кВ	Испытательное напряжение внешней изоляции, кВ		Примечание
		полный импульс	срезанный импульс	
35	40,5	195	240	ГОСТ 15161-76
110	126,0	480	600	
150	172,0	660	825	
220	252,0	950	1190	
330	363,0	1200	1400	
500	525,0	1600	1950	
750	787,0	2100	2600	ГОСТ 206.90-75

установки определяется выдерживаемым напряжением под дождем и импульсным.

В первом приближении  $l_{сxp}$  можно приравнять высоте воздушной части ввода ( $l_{сxp} \approx H_{фг}$ ). Высота масляной части ввода принимается равной половине высоты воздушного конца, а в некоторых случаях по конструктивным соображениям она может отличаться в большую или меньшую сторону ( $H_{фм} \approx H_{фг}/2$ ). В дальнейшем высота верхней (воздушной) и нижней (масляной) покрышек ввода может корректироваться с учетом геометрических размеров тела остова ввода и конструктивных решений.

### 1.2.2. Выбор токоведущего стержня.

Радиус токоведущего стержня находим из условия минимума максимальной напряженности поля

$$\zeta_c = \frac{1,8 U_{расч}}{3,6 E_{сmax}}, \quad (1.3)$$

где  $E_{сmax}$  - расчетный максимальный градиент, определяемый по формуле (1.1).

Радиус стержня, полученный расчетным путем, необходимо проверить по токовой нагрузке. Проверка производится по допустимой плотности тока  $j_{доп}$  для токоведущих стержней изоляторов. Обычно токоведущие стержни выполняются в виде латунных или медных труб. Исходя из токовой нагрузки радиус токоведущего стержня может быть найден из выражения

$$I_H = j_{доп} \cdot \pi r_c^2, \quad (1.4)$$

где  $I_H$  - номинальный ток, А;

$j_{доп}$  - допустимая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>.

Допустимые токи (плотность тока) для токоведущих стержней изоляторов принимаются в 2-2,5 раза меньше значений, указанных в табл. 1.3.

В результате расчета по формулам (1.3 и 1.4) должен быть выбран стержень (труба) с размерами, удовлетворяющими требованиям как по минимальной напряженности, так и по допустимой плотности тока.

### 1.2.3. Расчет внутренней изоляции ввода и геометрических размеров конденсаторных обкладок.

Для определения основных соотношений между аксиальными и радиальными размерами ввода мысленно сдвинем конденсаторные обкладки так, чтобы их нижние концы находились на одном уровне (рис. 1.3, а).

Таблица I.3

Длительно допустимые токи для медных шин трубчатого сечения

Внутренний и внешний диаметр трубы, мм	Сечение трубы, мм <sup>2</sup>	Допустимый ток (в воздухе), А
35 - 40	297	1100
40 - 45	337	1200
45 - 50	378	1330
50 - 55	418	1380
55 - 60	457	1585
60 - 65	495	1685
65 - 70	535	1875
70 - 75	575	2000
78 - 80	615	2120
80 - 85	650	2205
90 - 95	725	2460
90 - 100	1500	3680

Для равноемкостных вводов при  $\epsilon = const$  справедливо соотношение

$$\gamma \ell E_z = const. \quad (I.5)$$

С учетом (I.5) можно записать

$$\frac{\gamma_{\varphi}}{\gamma_c} = \frac{\ell_c E_{zc}}{\ell_{\varphi} E_{z\varphi}}, \quad (I.6)$$

где  $\gamma_{\varphi}$  и  $\ell_{\varphi}$ ,  $\gamma_c$  и  $\ell_c$  - радиус и длина фланца и стержня соответственно;  $E_{zc}$  и  $E_{z\varphi}$  - радиальный градиент у стержня и у фланца соответственно.

Обычно на практике принимают  $E_{zc} = E_{z\varphi}$ ; тогда

$$\frac{\gamma_{\varphi}}{\gamma_c} = \frac{\ell_c}{\ell_{\varphi}} = Z.$$

При  $Z = 3,6$  радиальная напряженность поля имеет минимальное значение.

При известном  $\gamma_c = \gamma_0$  ( $\gamma_c$  определен выше)  $\gamma_{\varphi} = 3,6 \gamma_c$ . Радиус сплошного токоведущего стержня из условия допустимой токовой нагрузки находится в пределах 1-3 см, что соответствует токам до 2000 А.

К расчету ввода с постоянной аксиальной напряженностью электрического поля

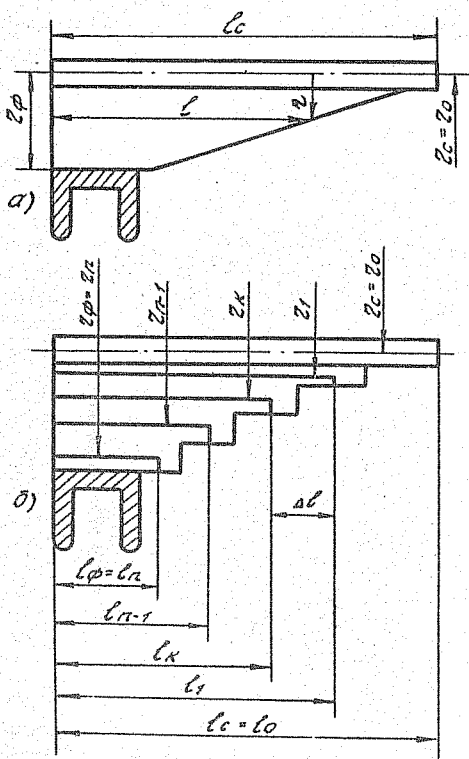


Рис.1.3

Искусственным приемом можно записать

$$l_c - l_\varphi = l_\varphi \left( \frac{l_c}{l_\varphi} - 1 \right)$$

или

$$l_c - l_\varphi = l_\varphi (Z - 1) = \frac{U_{расч}}{E_\rho},$$

где  $E_\rho$  - приведенная аксиальная напряженность.

Тогда

$$l_\varphi = \frac{U_{расч}}{2,6 E_\rho}, \quad \alpha \quad l_c = Z \cdot l_\varphi = \frac{3,6 U_{расч}}{2,6 E_\rho}. \quad (I.7)$$

Оптимальное количество уравнильных обкладок в изоляции

$$n = 1,82 \cdot 10^{-4} E_{z \max} \cdot U_{расч} \cdot \varepsilon, \quad (I.8)$$

где  $E_{z \max}$  - расчетная допустимая максимальная напряженность, кВ/см;

$U_{расч}$  - расчетное напряжение, кВ;  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость бумажно-масляной изоляции, которую можно определить из выражения

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_K}{\frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_n} - K_n \frac{\gamma_\delta}{\gamma_K} \left( \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_n} - 1 \right)}, \quad (I.9)$$

где  $\varepsilon_K$  - диэлектрическая проницаемость клетчатки ( $\varepsilon_K = 6,5$ );  $\varepsilon_n$  - диэлектрическая проницаемость пропитывающего состава ( $\varepsilon_n = 2,2$ );  $K_n$  - коэффициент запрессовки ( $K_n = 0,8-0,95$ );  $\gamma_\delta$  - удельный вес бумаги ( $\gamma_\delta = 0,7$  г/см<sup>3</sup>);  $\gamma_K$  - удельный вес клетчатки ( $\gamma_K = 1,55$  г/см<sup>3</sup>).

В табл. I.4 приведено рекомендуемое число основных обкладок и дополнительных (манжет) в изоляторе для разных классов напряжения.

Таблица I.4

Номинальное напряжение, кВ	Количество уравнильных обкладок	Количество обкладок	
		основных	дополнительных
110	20	20	-
150	30	30	-
220	40	10	30
330	60	20	40
500	90	30	60

Применение манжет (рис. I.4) позволяет выровнять поле на краях основных конденсаторных обкладок. Незначительная длина дополнительных обкладок (120-200 мм) существенно не затрудняет процесс сушки и пропитки изоляции.

Ступенчатая защита краев основных (I)  
конденсаторных обкладок с помощью манжет (2)



Рис. I.4

Напряжение, приходящееся на элементарный слой

$$\Delta U = \frac{U_{расч}}{n}, \quad (I.10)$$

где  $n$  - количество основных конденсаторных обкладок.

При постоянстве аксиальной напряженности длина уступа в верхней (воздушной) части ввода

$$\Delta \ell_g = \frac{\Delta U}{E_{\ell g}}. \quad (I.11)$$

Длина воздушной части ввода

$$\ell_g = n \Delta \ell_g + \ell_{\varphi}. \quad (I.12)$$

Длина уступа в нижней (масляной) части ввода

$$\Delta \ell_n = \frac{\Delta U}{E_{\ell n}}. \quad (I.13)$$

Длина масляной части ввода

$$\ell_n = n \Delta \ell_n. \quad (I.14)$$

Не рекомендуется принимать длину уступа в масле  $\Delta \ell_n \leq 1,5 \text{ см}$ .  
Расчетная длина уступа (рис. I.3, б)

$$\Delta \ell = \Delta \ell_g + \Delta \ell_n = \frac{\ell_c - \ell_{\varphi}}{n} = \frac{\Delta U}{E_{\ell}}. \quad (I.15)$$



Длина стержня

$$l_c = l_o = l_g + l_n = n \Delta l + l_\varphi. \quad (I.16)$$

В соответствии с рис. I.3, б длины промежуточных конденсаторных обкладок будут:

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= l_c - \Delta l \\ l_2 &= l_c - 2 \Delta l \\ l_K &= l_c - K \Delta l \\ l_n &= l_\varphi = l_c - n \Delta l \end{aligned} \right\} \quad (I.17)$$

где  $K$  - порядковый номер обкладки, считая от стержня;  $n$  - количество основных конденсаторных обкладок.

Расчет будет удовлетворительным, если

$$E_{l_g} = \frac{U}{\sum \Delta l_g} < 5,5 \text{ кВ/см}, \text{ а } E_{l_n} = \frac{U}{\sum \Delta l_n} < 12 \text{ кВ/см}.$$

Емкость слоя между двумя уравнительными обкладками равна

$$C_K = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon l_K}{l_n \frac{z_K}{z_{K-1}}}, \quad \varphi, \quad (I.18)$$

где  $l_K$  - активная длина обкладок, см;

$$\epsilon_0 = 0,00885 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/см}.$$

Для удобства расчетов можно использовать формулу

$$C_K = \frac{0,555 \epsilon l_K}{l_n \frac{z_K}{z_{K-1}}}, \quad \text{мкФ}, \quad (I.19)$$

$$\text{Емкость на единицу длины } C'_K = C_K / l_n, \quad \text{мкФ/см}. \quad (I.20)$$

Максимальная радиальная напряженность в "К"-м слое на внутренней его поверхности

$$E_{\max z_K} = \frac{\Delta U}{z_{K-1} l_n \frac{z_K}{z_{K-1}}}, \quad \text{кВ/мм}. \quad (I.21)$$

Радиусы промежуточных обкладок определяются из соотношения

$$l_n \frac{z_K}{z_c} = l_n \frac{z_{K-1}}{z_c} + A l_K, \quad (I.22)$$

где  $A = \frac{\Delta U}{\rho_1 \tau_c E_{zc}}$ ,  $E_{zc}$  - максимальная радиальная напряженность на токоведущем стержне ( $E_{zc} = E_{max \tau_1}$ ).

Радиус первой обкладки определяется из выражения

$$\rho_1 \frac{\tau_1}{\tau_c} = A \rho_1 \quad (I.23)$$

Последующие значения  $\rho_1 \frac{\tau_K}{\tau_c}$  получаются путем суммирования  $A \rho_K$  и определенного ранее значения  $\frac{\rho_1 \tau_{K-1}}{\tau_c}$ .

Расчет позволяет обеспечивать высокую точность при условии, если величины  $A \rho_K$  вычислены с точностью порядка трех-четырех знаков.

Зная радиусы обкладок, можно определить толщину  $K$ -го слоя

$$\Delta \tau_K = \tau_K - \tau_{K-1} \quad (I.24)$$

Характерная зависимость  $\Delta \tau_K$  от номера слоя  $K$  приведена на рис. I.5.

Зависимость  $\Delta \tau_K$  от номера слоя

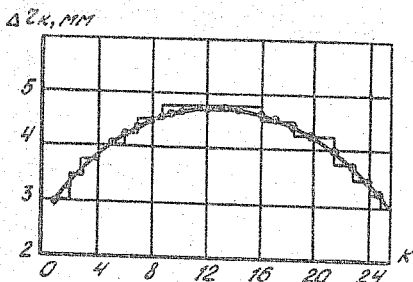


Рис. I.5

Все вышеприведенные расчеты целесообразно производить по типу табл. I.5.

Таблица I.5

Номер слоя, $K$	Толщина слоя, $\Delta \tau_K$ , мм	$\tau_{K-1}$ , мм	$\tau_K$ , мм	$\rho_1 \frac{\tau_K}{\tau_{K-1}}$	$C_K$ , Ф
1.					
2.					
3.					
и т.д.					

Продолжение табл. I.5

Номер слоя, К	$C'_k,$ Ф/мм	$\Delta U_k,$ кВ	$E_{max} \tau_k,$ кВ/мм	$E_{min} \tau_k,$ кВ/мм
1.				
2.				
3.				
и т.д.				

После определения длин и радиусов конденсаторных обкладок изолятора необходимо произвести поверочный расчет максимальных и минимальных напряженностей в слое и сравнить их с допустимым радиальным градиентом.

Максимальные радиальные напряженности во всех слоях можно определить из формулы

$$E_{max} \tau_k = \frac{\Delta U_k}{A \rho_k \tau_{k-1}} = E_{\tau c} \frac{\rho_1 \tau_c}{\rho_k \tau_{k-1}} \quad (I.25)$$

Минимальные радиальные напряженности в слоях определяются по формуле

$$E_{min} \tau_k = E_{\tau c} \frac{\rho_1 \tau_c}{\rho_k \tau_k} \quad (I.26)$$

Падение напряжения в слое

$$\Delta U_k = E_{max} \tau_k \tau_{k-1} \rho_k \frac{\tau_k}{\tau_{k-1}} \approx const. \quad (I.27)$$

При этом максимальные напряженности в первом и последнем слое должны совпадать с заданными  $E_{\tau c}$  и  $E_{\tau \phi}$ . На рис. I.6 приведена характерная зависимость радиальных напряженностей в слоях конденсаторного ввода.

При конструировании вводов на большие номинальные токи и напряжения необходимо в конструкции вводов предусмотреть возможность циркуляции масла путем введения одного-двух циркуляционных каналов. Как правило, один канал образуется между токоведущей трубой и изоляционным остовом, а второй - в средней части ввода. При этом соседние обкладки, создающие масляный канал, соединяются между собой электрически.

Зависимость радиальных напряженностей  
в слоях ввода конденсаторного типа

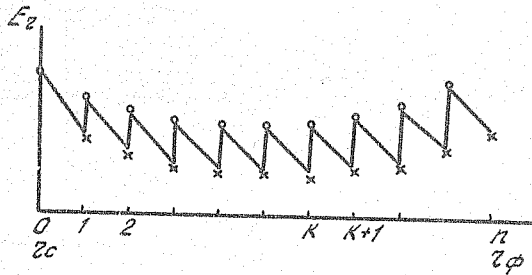


Рис. I.6

Например, во вводах на класс напряжения 500 кВ при принимаемых значениях  $E_{r \max} = 9$  кВ/мм радиус стержня принимается значительно больше, чем радиус токоведущего стержня, определяемого расчетным путем. В этом случае "нулевая" обкладка, т.е. обкладка с радиусом  $r_c = r_0$  укладывается на бакелитовый цилиндр. Электрический контакт между трубой и обкладкой осуществляется с помощью гибких проводников. Пространство между токоведущим стержнем и бакелитовым цилиндром образует канал для циркуляции масла.

Для вводов с постоянной аксиальной напряженностью поля

$$E_{r_c} = E_{r \max} = \frac{U_{расч} \left(1 + \frac{l_{\varphi}}{l_c}\right)}{2 r_c l_n \frac{l_c}{l_{\varphi}}} \quad (I.28)$$

Если  $\frac{l_c}{l_{\varphi}} = \frac{r_{\varphi}}{r_c} = 3,6$ , то

$$E_{r \max} = \frac{U_{расч} \left(1 + \frac{1}{3,6}\right)}{2 r_c l_n 3,6} = \frac{U_{расч}}{1,98} \quad (I.29)$$

Средняя радиальная напряженность определится из выражения

$$E_{r_{ср}} = \frac{U_{расч}}{r_{\varphi} - r_c} = \frac{U_{расч}}{r_c \left(\frac{r_{\varphi}}{r_c} - 1\right)} = \frac{U_{расч}}{2,6 r_c} \quad (I.30)$$

Расчет считается удовлетворительным, если коэффициент неравномерности поля

$$K = \frac{E_{r \max}}{E_{r_{ср}}} = 1,31 \quad (I.31)$$

### 1.2.4. Расчет и конструирование фарфоровой покрышки.

Фарфоровая покрышка представляет собой полый изолятор цилиндрической или конической формы. Покрышка надевается на изоляционный остов и предохраняет внутреннюю изоляцию ввода от внешних воздействий (влаги, загрязнения и т.д.) (рис.1.7).

Выше отмечалось, что высоту верхней (воздушной) покрышки ввода находят по средним значениям выдерживаемых напряженностей при различных видах воздействий напряжения и выбирают наибольшую. При этом из конструктивных соображений она должна на 30-40% превышать сумму длин уступов верхней части изоляционного сердечника. Это позволяет в некоторой мере улучшить распределение напряжения вдоль поверхности ввода.

Конструкция фарфоровой покрышки

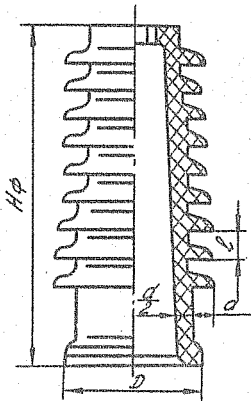


Рис.1.7

Окончательно высота покрышки в воздухе может быть определена из выражения

$$H_{фв} = \frac{U_v}{0,75}, \quad (I.32)$$

а в масле

$$H_{фн} = \frac{U_n}{0,75}. \quad (I.33)$$

Внутренний диаметр покрышки у соединительной втулки (фланца) принимают на 25-30 мм больше наружного диаметра изоляционного остова. Зазор между внутренней поверхностью покрышки и остовом обеспечивает циркуляцию масла и облегчает технологию сборки ввода.

Толщина фарфоровой покрышки обычно составляет 25-35 мм, но у вводов на сверхвысокие напряжения она достигает 50 мм.

Для повышения электрической прочности ввода покрышки снабжаются ребрами различной конфигурации. Ребра у покрышек для наружной установки имеют капельницы для предотвращения затекания воды на нижнюю часть ребра.

Число ребер в воздушной части ввода может быть выбрано по формуле

$$n = 1,5 + 0,065 U_n, \quad (I.34)$$

где  $U_H$  - номинальное напряжение изолятора, кВ.

В табл. I.6 приведено число ребер для изоляторов наружной установки.

Таблица I.6

Номинальное напряжение, кВ	6	10	20	35	110	150	220
Число ребер	1	1-2	2-3	2-3	8-10	12-15	16-20

Изоляторы, предназначенные для работы в условиях загрязнения, имеют большее число ребер, чем это следует из формулы (I.34) и табл. I.6.

Угол наклона ребра берут порядка 15-25°.

При нормальных условиях эксплуатации отношение  $a/l$  не должно превышать 0,5, где  $a$  - вылет ребра,  $l$  - шаг ребра. Обычно вылет ребра колеблется в пределах 50-70 мм. При работе в условиях загрязнения отношение  $a/l$  рекомендуется увеличивать до 0,8-1,0. Шаг ребра  $l = H_{фг}/n$ , где  $n$  - число ребер.

Обычно фарфоровые покрышки, расположенные в масле, при невысоких значениях  $U_H$  изготавливаются гладкими, т.е. без ребер. При  $U_H > 110$  кВ для увеличения разрядных напряжений фарфоровые покрышки в масле могут быть волнистыми или с ребрами, но их количество и размеры меньше, чем количество и размеры ребер в воздухе.

### I.3. Механический расчет ввода

Как правило, механический расчет вводов является простым расчетом на изгиб. Изгибающее усилие  $P_{изг}$  или задается, или его необходимо определить, исходя из воздействующих факторов.

Если известно изгибающее усилие  $P_{изг}$ , то

$$\sigma_{изг} = \frac{P_{изг} \cdot H}{W} \leq [\sigma_{изг}], \quad (I.35)$$

где  $\sigma_{изг}$  - изгибающее напряжение фарфора, кгс/см<sup>2</sup>;

$H$  - плечо изгибающего момента, см;

$W$  - момент сопротивления опасного сечения изолятора, см<sup>3</sup>.

$$W \approx 0,1 \frac{D^4 - d^4}{D}$$

где  $D$  - наружный диаметр фарфора, см;  $d$  - внутренний диаметр фарфора, см.

Расчет производится методом подбора. Задаваясь значениями  $D$  и  $d$ , определяют сечение фарфора  $S$ , а по этому сечению определяют из графика (рис. I.8) соответствующее минимальное допустимое значение прочности фарфора на изгиб  $[\sigma_{изг}]$ . Затем определяется  $W$  и подставляется в уравнение (I.35). Если расчетное значение  $\sigma_{изг}$  превышает допустимое значение, определенное из рис. I.8, то расчет необходимо повторить при других  $D$  и  $d$ , добиваясь равенства правой и левой части уравнения (I.35).

Зависимость механической прочности фарфора от сечения

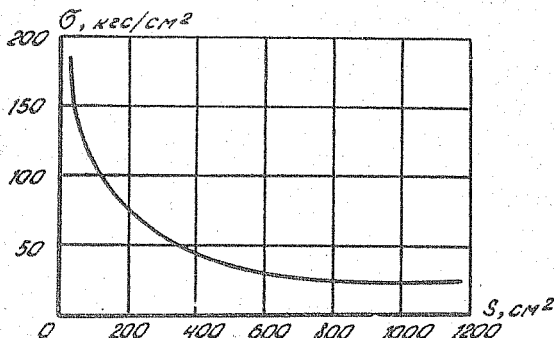


Рис. I.8

Для вводов на  $U_H \geq 110$  кВ следует учитывать следующие нагрузки.

1. Тяжение проводов, присоединенных к вводу.
2. Ветровые нагрузки. Давление ветра на изолятор в горизонтальном направлении

$$P_B = KF \frac{U^2}{16} \sin \theta, \text{ кгс}, \quad (\text{I.36})$$

где  $K$  - аэродинамический коэффициент,  $K = 0,7$ ;  $\theta$  - угол, образуемый направлением ветра с осью изолятора;  $F$  - площадь сечения ввода, м<sup>2</sup>;  $U$  - скорость ветра, м/с.

3. Нормальную составляющую веса изолятора (для наклонных вводов).

#### 4. Нагрузку от электродинамических сил.

Затем определяют суммарный момент сил и проверяют прочность фарфора на изгиб

$$\sigma_{изг} = \frac{\sum M_{изг}}{W} \leq [\sigma_{изг}].$$

Для случая заделки фарфора в арматуру при помощи цементной заделки необходимо выполнить расчет напряжения смятия цемента в заделке среднего фланца ввода

$$\sigma_{сж} = \frac{3\rho_{изг} \cdot H_{изг}}{h^2 \cdot D_u} \leq [\sigma_{сж}], \quad (I.37)$$

где  $\rho_{изг}$  — изгибающее усилие, кгс;  $H_{изг}$  — изгибающее плечо, см;  $h$  — высота цементной заделки, см;  $D_u$  — диаметр цементной заделки, см.

Допустимое значение напряжения смятия цемента  $[\sigma_{сж}] = 400 - 600$  кгс/см<sup>2</sup>. Толщина цементных швов и стенки фланца выбирается равной 4 + 5 мм.

В определенных условиях эксплуатации внутренняя полость покрышек может накопиться под давлением газа или жидкости. В этом случае наибольшее нормальное напряжение в фарфоре определяется равенством

$$\sigma = \frac{2\rho \cdot r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{\rho \cdot r_1^2}{r_{ср} \cdot S}, \quad (I.38)$$

где  $\rho$  — давление в кгс/см<sup>2</sup>;  $r_1$  и  $r_2$  — внутренний и наружный радиус фарфоровой покрышки, см;  $S$  — толщина стенки фарфора, см.

$$r_{ср} = \frac{r_1 + r_2}{2}.$$

Расчетное значение  $\sigma$  не должно превышать допустимых значений, определяемых по рис. I.8, в зависимости от сечения фарфора. Наличие ребер несколько увеличивает механическую прочность фарфора.

#### I.4. Расчет тепловой устойчивости конденсаторного ввода

В эксплуатации вводы подвергаются нагреву за счет тепла, выделяемого в изоляции, токоведущих частях и из-за внешнего источника тепла. В связи с ухудшенным теплоотводом, обусловленным конструктивным исполнением, конденсаторные вводы при расчете проверяются на



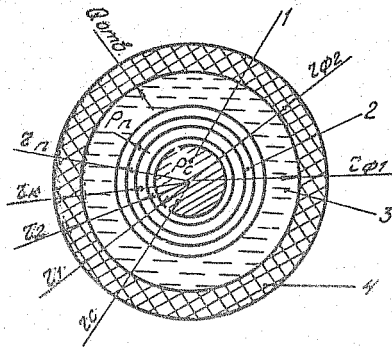
возможность теплового пробоя аналитическим или графоаналитическим способами при заданном токе и наибольшем допустимом рабочем напряжении. Температура окружающей среды обычно принимается  $+40^{\circ}\text{C}$ .

Считают, что все тепло, выделяемое в токоведущем стержне и изоляции, уходит только в радиальном направлении (из-за больших аксиальных размеров изолятора). Это дает некоторый запас по тепловой устойчивости.

При расчете определяется наличие или отсутствие установившегося теплового режима изоляции. Для решения поставленной задачи часто применяется графоаналитический метод, который, по сравнению с аналитическим, является менее точным, но отличается наглядностью и сравнительной простотой решения задачи.

Для проведения расчета изоляция ввода делится на ряд концентрических слоев (рис. I.9) и определяется количество тепла, подводимого к изоляции изнутри  $P_{11}$  (потери в токоведущем стержне и диэлектрические потери), и количество тепла, которое может быть отведено в окру-

Сечение ввода конденсаторного типа



1 - токоведущий стержень; 2 - изоляционный остов; 3 - масло;  
4 - фарфоровая покрывка

Рис. I.9

жающую атмосферу  $Q_{018}$ . При расчете задаются рядом значений температуры стержня  $t_{c1}$ ,  $t_{c2}$ ,  $t_{c3}$  и т.д. При этом значения задаваемых произвольно температур должны быть близки к реально возможным температурам стержня (например, 60, 70, 80, 90, 100, 110 $^{\circ}\text{C}$ ). Затем для каждого выбранного значения температуры стержня  $t_c$  рассчитывается прохож-

ление теплового потока  $\rho$  в радиальном направлении на единицу длины стержня (I м) в единицу времени (I с).

При расчете обычно принимают, что значение  $tg\delta$  изоляционного материала во всех точках данного слоя одинаково и соответствует максимальной температуре данного слоя изоляции. Так, например, температура первого слоя изоляции приравнивается температуре стержня  $t_c$ . На рис. I.10 приведена зависимость  $tg\delta = f(t)$  для аппаратной бумажно-масляной изоляции. Эта зависимость может быть представлена экспоненциальной функцией

$$tg\delta = tg\delta_0 e^{\alpha(t-t_0)}, \quad (I.39)$$

Зависимость  $tg\delta$  от температуры для  
бумажно-масляной изоляции

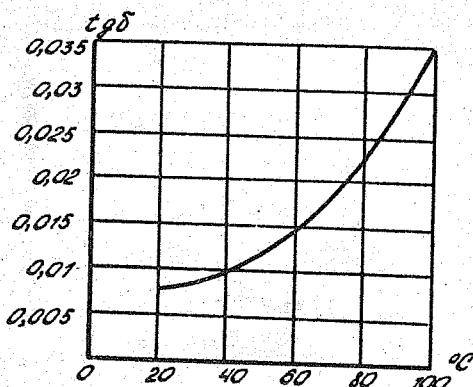


Рис. I.10

где  $tg\delta_0 = 0,006$  при  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 0,0186$ .

Складывая последовательно тепловые потоки от стержня с коэффициентом тепла, выделяемого в каждом слое изоляции, можно определить перепад температуры на каждом слое, а также температуру наружного слоя изоляции  $t_n$ .

Потери мощности в токоведущем стержне

$$P_c = I_n^2 R_{20} [1 + \alpha(t_c - 20)], \quad \text{Вт/м}, \quad (I.40)$$

где  $I_n$  - номинальный ток в стержне, А;  $R_{20}$  - омическое сопротивление стержня длиной 1 м при температуре 20°C, Ом/м;  $R_{20} = \rho_{20}/S$ ,  $\rho_{20}$  - удельное объемное сопротивление материала стержня при 20°C;  $S$  - сечение стержня, мм<sup>2</sup>;  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления материала стержня, 1/°C (для меди  $\alpha = 0,0039$  1/°C, для алюминия  $\alpha = 0,0049$  1/°C);  $t_c$  - расчетное значение температуры стержня, °C. (При  $t_0 = 20$ °C удельное объемное сопротивление меди  $\rho_{20} = 0,0172 + 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ , алюминия  $\rho_{20} = 0,028 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ ).

Потери в изоляции первого слоя

$$P_{u1} = 2\pi f C_1 U_1^2 \operatorname{tg} \delta_1, \text{ Вт/м}, \quad (\text{I.41})$$

где  $f$  - частота, Гц;  $C_1$  - емкость первого слоя изоляции на единицу длины, Ф/м;  $U_1$  - рабочее напряжение, приходящееся на первый слой изоляции, В;  $\operatorname{tg} \delta_1$  - тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции первого слоя при максимальной температуре слоя  $t = t_c$ .

Суммарные потери в стержне и в первом слое будут равны  $P_1 = P_c + P_{\text{тер}}$ . Перепад температуры в первом слое изоляции

$$\Delta t_1 = P_1 \cdot R_{t1}, \quad (\text{I.42})$$

где  $R_{t1}$  - тепловое сопротивление первого слоя с радиусом  $r_1$  на единицу длины

$$R_{t1} = \frac{1}{2\pi \lambda \delta} \ln \frac{r_1}{r_c}, \quad \frac{\text{м}^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}, \quad (\text{I.43})$$

где  $\lambda \delta$  - коэффициент теплопроводности бумажно-масляной изоляции ( $\lambda \delta = 0,21 + 0,25 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$ );  $r_c$  - радиус стержня.

Температура первой обкладки с радиусом  $r_1$  будет

$$t_1 = t_c - \Delta t_1. \quad (\text{I.44})$$

Затем определяется температура второй обкладки:

$$P_2 = P_1 + P_{u2}; \quad \Delta t_2 = P_2 \cdot R_{t2}, \quad \text{где}$$

$$R_{t2} = \frac{1}{2\pi \lambda \delta} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{и} \quad t_2 = t_1 - \Delta t_2.$$

Для  $n$ -го слоя изоляции:

$$P_n = P_{n-1} + P_{un} = P_c + \sum_{i=1}^n P_{ui};$$

$$\Delta t_n = \rho_n \cdot R_{t_n}, \text{ где } R_{t_n} = \frac{1}{2\pi \lambda \delta} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}},$$

$$t_n = t_{n-1} - \Delta t_n.$$

Таким образом, для принятой температуры стержня  $t_c$  определяется температура внешней поверхности остова ввода; затем находят  $\rho_n$  и  $t_n$  для других значений  $t_c$  по вышеизложенной схеме.

Все расчеты рекомендуется производить по типу табл. I.7 для каждого расчетного значения температуры стержня  $t_c$ .

Таблица I.7

Номер слоя	$\rho_{ui},$ Вт/м	$\text{tg} \delta_i$	$\rho_i,$ Вт/м	$R_{ti},$ м°С/Вт	$\Delta t_i,$ °С	$t_i,$ °С	Примечание
0	—	—	$\rho_c$	—	—	$t_c$	Температура стержня
1							
2							
и т.д.							$t_c = t_{c1}$

По 4-5 точкам строится график (рис. I.11) изменения величины теплового потока от температуры поверхности изоляционного остова  $\rho_n = f(t_n)$ .

Количество тепла, отводимого в единицу времени от наружной поверхности остова, для каждого значения  $t_n$  можно определить

$$Q_{отв} = \frac{t_n - T_0}{R_{t_n} + R_{t\varphi} + R_0}, \text{ Вт/м}, \quad (I.45)$$

где  $T_0$  — температура окружающей среды, °С ( $T_0 = 40^\circ\text{C}$ );  $R_{t_n}$ ,  $R_{t\varphi}$  — тепловое сопротивление масляного канала и фарфора на единицу длины соответственно:

$$R_{t_n} = \frac{1}{2\pi \lambda_M} \ln \frac{r_{\varphi 1}}{r_n}; \quad R_{t\varphi} = \frac{1}{2\pi \lambda_\varphi} \ln \frac{r_{\varphi 2}}{r_{\varphi 1}}. \quad (I.46)$$

$$\lambda_M = 0,15 - 0,20 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}; \quad \lambda_\varphi = 1,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}};$$

### К определению тепловой устойчивости ввода

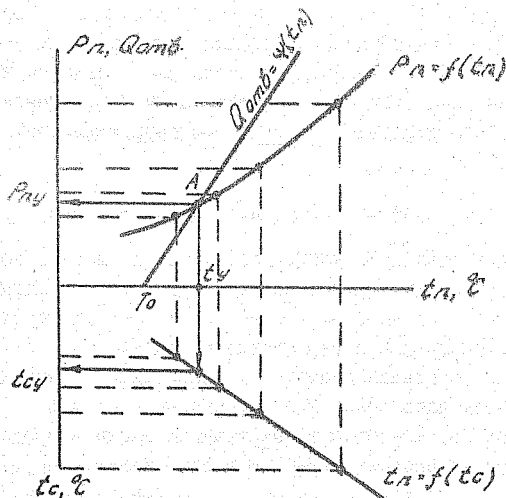


Рис. I.11

$R_0$  - сопротивление, учитывающее теплоотдачу с поверхности фарфора в окружающую среду на единицу длины:

$$R_0 = \frac{1}{2\pi d_t \cdot \zeta \varphi_2}, \quad (I.47)$$

где  $d_t$  - коэффициент теплоотдачи от изолятора в воздух (для фарфора в воздухе  $d_t = 21,0 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ );  $\zeta \varphi_1$  и  $\zeta \varphi_2$  - внутренний и внешний радиусы фарфоровой покрышки.

На график (рис. I.11) наносится прямая  $Q_{отб} = \psi(t_n)$  и зависимость  $t_n = f(t_c)$ . При наличии тепловой устойчивости прямая  $Q_{отб}$  пересекается с кривой  $P_n$  в некоторой точке А, соответствующей температуре устойчивого теплового равновесия  $t_y$ , по которой, в свою очередь, можно определить температуру стержня  $t_{cy}$ , при которой возможна устойчивая работа ввода.

Непересечение кривых  $P_n$  и  $Q_{отб}$  (отсутствие теплового равновесия) указывает на возможность теплового пробоя. В этом случае необходимо произвести повторный электрический расчет ввода с последующей проверкой на возможность теплового пробоя ввода. Для повышения тепловой устойчивости изолятора необходимо уменьшить выделение

тепла внутри изолятора, так как условия внешней среды считаются неизменными. Это достигается улучшением качества изоляции, в основном уменьшением ее  $t_{g\delta}$  за счет пропитки изоляции минеральным маслом повышенной очистки, а также увеличением поперечного сечения токоведущего стержня, уменьшения толщины изоляции за счет повышения рабочих напряженностей, что уменьшает ее тепловое сопротивление, и рядом других мер.

### 1.5. Конструирование конденсаторного ввода

После завершения электрического, механического и теплового расчетов окончательно определяют основные геометрические размеры ввода, способы крепления тела остова ввода, фиксации токоведущего стержня, крепления фарфоровой крышки и герметизации ввода.

Для улучшения теплоотвода и повышения электрической прочности вводы на высшие классы напряжения имеют несколько (обычно 2-3) цилиндрических каналов, обеспечивающих циркуляцию масла в продольном направлении. При этом у вводов на 220 кВ и выше намотку осуществляют на бакелизованную трубу такого размера, чтобы между токоведущим стержнем и внутренней поверхностью бакелизированной трубы получился масляный канал толщиной 15-20 мм. Соседние оболочки масляных каналов электрически соединяются между собой. Токоведущий стержень соединяется также электрически с конденсаторной обкладкой, расположенной на бакелизированной трубе.

На эскизе (рис. I.12) изображены основные конструктивные элементы ввода с принятыми обозначениями его основных продольных размеров. Обычно последняя (заземленная) обкладка ввода выступает за пределы фланца на длину, равную  $0,1 H_{ф\delta}$  в воздухе и  $0,1 H_{фМ}$  в масле. Такое исполнение ввода затрудняет возникновение и развитие скользящих разрядов у среднего фланца вследствие его экранирования. Высота среднего фланца обычно строго не регламентируется и может выбираться, исходя из конструктивных соображений, в пределах  $H_{ф1} = (0,15-0,30)H_{ф\delta}$ . Верхний край первой обкладки в воздушной части ввода отстоит от головки изолятора приблизительно на  $0,15 H_{фМ}$ , а в нижней части ввода на  $0,15 H_{фМ}$ . Этим достигается экранировка верхней и нижней части ввода, что также затрудняет образование скользящих разрядов на наружной поверхности.

Для обеспечения высокой герметичности вводов рекомендуется изготавливать вводы со встроенными или выносными баками давления (компенсаторами). Вводы на  $U_n \geq 330$  кВ должны быть снабжены экранами для выравнивания поля и улучшения разрядных характеристик.

Эскиз ввода конденсаторного типа с бумажно-масляной изоляцией

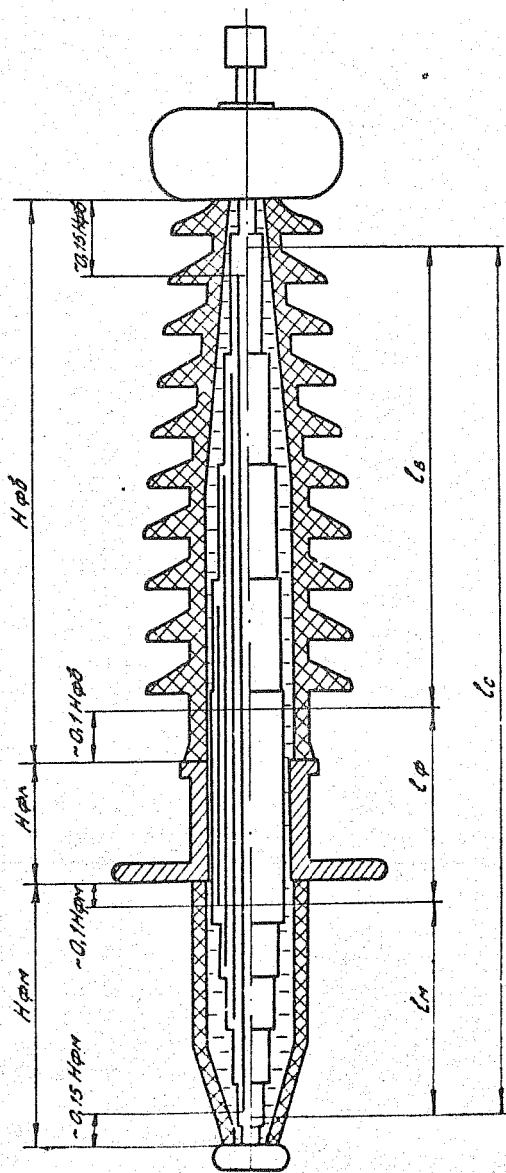


Рис. I.12

У конденсаторных вводов высокого напряжения в целях отбора напряжения и контроля состояния внутренней изоляции должны быть предусмотрены специальные измерительные выводы для подсоединения устройства ПИИ с помощью проходного изолятора в среднем фланце. У вводов с выводом для подключения ПИИ измерительная и заземляемая обкладки выполняются из медной фольги. Поверх последней обкладки остова наносят три-четыре слоя кабельной бумаги, которая закрепляется хлопчатобумажной лентой или приклеивается.

В выводе через проходной фарфоровый изолятор пропущен медный провод сечением не менее  $2,5 \text{ мм}^2$ , присоединенный к предпоследней (измерительной) обкладке. Другим концом медный проводник припаивается к токоведущему стержню фарфорового проходного изолятора. Такой же проводник припаивается к последней обкладке из медной фольги и выводится наружу, или подсоединяется непосредственно к соединительной втулке внутри ввода. Последняя фланцевая обкладка наглухо заземляется внутри ввода. Толщина изоляции между последней и предпоследней обкладками выбирается так, чтобы получить нужное соотношение емкости между ними и основной емкостью изолятора (требуемый коэффициент деления напряжения). Чтобы иметь возможность регулирования коэффициента деления, к выводу измерительной обкладки можно подключить радиотехнические конденсаторы необходимой емкости.

Большинство трансформаторных маслонаполненных вводов выпускается в настоящее время протяжного типа, т.е. с подсоединением отвода обмотки непосредственно к контактной шпильке верхнего узла. В этом случае центральная медная труба ввода не является токоведущим элементом. Подсоединение отвода обмотки к нижнему контактному узлу ввода характерно в основном для мощных силовых трансформаторов первых выпусков. Некоторые типы герметичных вводов на напряжение 220 кВ имеют так называемое штекерное соединение с обмоткой силового трансформатора. При таком соединении на нижнем контактном узле укреплен специальный токоведущий стержень, а контактная розетка укрепляется на отводе обмотки силового трансформатора. Вводы штекерного типа во многом обеспечивают удобство монтажа, однако из-за ряда технологических и конструктивных особенностей не получили в отечественной практике достаточного широкого распространения.

Для повышения электрической прочности изолирующего промежутка в месте прохождения отвода обмотки силового трансформатора и для выравнивания градиентов в бумажно-масляной изоляции ввода на его нижнюю часть надевают металлические экраны. У вводов на напряжение 220 кВ и выше экраны имеют изоляционное покрытие.



Для обеспечения герметичности конструкции ввода в местах соединения покрышки с соединительной втулкой и арматурой устанавливаются уплотняющие прокладки из маслостойкой резины по ГОСТ 12855-77. Для вводов герметичного исполнения к качеству выполнения уплотнений предъявляют более высокие требования. Поэтому у этих вводов между деталью и фарфором кроме резинового уплотнения устанавливают дополнительно прокладку из паронита или картона, толщина которой выбирается с учетом сжатия резины примерно на 20%.

Механическое соединение покрышек осуществляется при помощи кулачков или нажимных колец, опирающихся на кольцевой борт, отформованный на конце покрышки. Механическое крепление фарфоровых покрышек маслонаполненных вводов с помощью нажимных колец применяется в тех случаях, если возможно воздействие на ввод больших динамических и статических нагрузок.

Из-за трудоемкости технологического процесса изготовления, многочисленных случаев повреждения фарфора в результате внутренних механических напряжений в цементной связке и других факторов заводы отказываются от фланцевого соединения покрышек с соединительными втулками и применяют бесфланцевое соединение деталей ввода с помощью специального пружинного устройства, которое одновременно является устройством, компенсирующим температурные изменения длины токоведущей трубы и стягиваемых деталей. При бесфланцевом креплении фарфоровых покрышек необходимое натяжение покрышки на соединительную втулку достигается применением специальных компенсирующих пружин, располагаемых, как правило, в расширителе вводов.

В изоляторах с бумажно-масляной изоляцией конденсаторные обкладки выполняются из алюминиевой фольги. Применение полупроводящих обкладок в данном случае практически не повышает напряжения возникновения частичных разрядов на краях обкладок.

Для облегчения технологического процесса сушки и пропитки изоляции целесообразно применение для обкладок перфорированной фольги. При этом характеристики частичных разрядов для изоляции со сплошной и перфорированной фольгой практически одинаковы. Это объясняется тем, что частичные разряды начинаются на краях обкладок, где поле сильнее, и поэтому перфорация фольги не ухудшает заметно характеристик частичных разрядов в изоляции.

На заводе после изготовления изоляционного остова производится его сушка под вакуумом. Остова вводов на напряжение 110 кВ, обмотанные промасленной бумагой, обычно не сушат, а подвергают вакуумированию после сборки ввода и заполнения его маслом.

Окончание сушки остовов вводов определяется по стабилизации емкости и  $tg\delta$ . Затем собранные вводы вакуумируются, заливаются маслом и вновь вакуумируются.

Конденсаторные вводы с бумажно-масляной изоляцией требуют очень хорошей герметичности конструкции, обеспечивающей разделение масла изолятора с маслом аппарата и исключающей возможность проникновения влаги внутрь фарфоровой крышки, т.к. попадание самых небольших количеств влаги внутрь изоляции резко снижает ее электроизоляционные свойства. Поэтому изготовление изоляторов с бумажно-масляной изоляцией сложно и требует большой тщательности.

Испытания вводов делятся на приемо-сдаточные, проводимые в процессе монтажа электроустановки; испытания при капитальном ремонте электрооборудования и межремонтные испытания, которые не связаны с выводом электрооборудования из работы для ремонта. Испытания должны проводиться с соблюдением всех требований, изложенных в правилах техники безопасности, с применением приборов, обеспечивающих необходимую точность измерения, и в объеме, определяемом конструкцией ввода.

В объем испытаний вводов входит: измерение сопротивления изоляции, измерение тангенса угла диэлектрических потерь и емкости, испытание повышенным напряжением, проверка герметичности уплотнений. Объем испытаний вводов может существенно меняться в зависимости от конструктивного исполнения ввода и вида его внутренней изоляции.

Измерение сопротивления изоляции производится мегаомметром на напряжение I-2,5 кВ.

Измерение  $tg\delta$  и емкости производится с помощью мостов (МД-16, Р-595 и т.д.) и приборов контроля влажности (ПКВ-7, ПКВ-13, ЕВ-3) соответственно.

Испытание повышенным напряжением частотой 50 Гц в эксплуатации получило распространение в основном для оценки состояния изоляции выводов и проходных изоляторов напряжением не выше 35 кВ.

При гидравлических испытаниях вводов осуществляется проверка герметичности уплотнений.

Ввод считается выдержавшим испытание, если по истечении 30 мин не наблюдалось течи масла или снижения испытательного давления. Заключительной операцией после испытания ввода на герметичность является проверка сообщаемости по маслу отдельных его элементов (в основном маслоуказателя). Для этого через маслоотборное устройство сливается небольшая порция масла и фиксируется изменение уровня масла в указателе.

## 2. РАСЧЕТ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

### 2.1. Краткие сведения о назначении и типах силовых конденсаторов

В высоковольтной технике, а также в энергетических установках для повышения коэффициента мощности используются обычно конденсаторы с бумажной или бумажно-пленочной (комбинированной) изоляцией, пропитанной минеральным (конденсаторным) маслом, жидкостями растительного происхождения (например, касторовое масло) или синтетическими жидкостями.

Для повышения коэффициента мощности электроустановок применяются косинусные конденсаторы, например: КС-10,5-7,5; КС1А-10,5-37,5; КМ2-6,3-24. Обозначения расшифровываются следующим образом: К - косинусный; С,М - род пропитки (синтетическая жидкость или минеральное масло); I,2 - габарит конденсатора (без цифры - нулевой габарит); А - наружная установка; 10,5 и 6,3 - номинальное напряжение в кВ; 7,5; 37,5; 24 - реактивная мощность в квар.

Для продольной компенсации реактивности ЛЭП с целью увеличения ее пропускной способности и динамической устойчивости используются косинусные конденсаторы типа КМП или КСП, например: КСП-0,66-36, где П означает - продольная компенсация.

Для улучшения коэффициента мощности сварочных трансформаторов разработан конденсатор типа КСТС-0,38-94: косинусный, с синтетической пропиткой, для сварочных трансформаторов (ТС), на номинальное напряжение 0,38 кВ и реактивную мощность 94 квар.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает комплектные конденсаторные установки (УК) с различными параметрами номинальных напряжений и реактивной мощности, например: УКА-0,38-78; УКН-0,38-94, где буква А означает - автоматическое выключение; Н - регулирование по напряжению.

Для регулирования коэффициента мощности электротермических установок применяются конденсаторы типа ЭСВ или ЭСВП, например: ЭСВП-1500-IT. Обозначения расшифровываются: Э - электротермический; С - синтетическая пропитка; В - водяное охлаждение; П - подстроечный; 1500 - номинальное напряжение в В; I - рабочая частота в кГц; Т - тропическое исполнение.

Для осуществления высокочастотной связи, отбора мощности, для делителей напряжения используются конденсаторы типа СМР, СМР, ДМР в изоляционном (фарфоровом) корпусе, например: СМР-55/√3-0,0044. Обозначения расшифровываются: С,С,Д - связь, отбор мощности, делитель;

М - минеральная пропитка; Р - расширитель; первая цифра - номинальное напряжение в кВ; вторая - номинальная емкость в мкФ.

В высоковольтной импульсной технике используются конденсаторы типа ИМ, ИМУ, ИК, например: ИК-100-0,4. Обозначения расшифровываются: И - импульсный; М, К - род пропитки (минеральная, касторовое масло); У - усиленный; первая цифра - номинальное напряжение в кВ; вторая - номинальная емкость в мкФ.

Расчет конденсатора заключается в том, чтобы по заданным значениям электрических характеристик определить наиболее оптимальные размеры и срок службы конденсатора.

Обычно при расчете заранее известен тип диэлектрика, используемого в данном конденсаторе. Тогда для выполнения расчетов должны быть заданы четыре основных параметра: номинальное рабочее напряжение  $U_{раб}$ , номинальная емкость конденсатора  $C$ , рабочая частота  $f$ , срок службы.

Для мощных конденсаторов переменного тока вместо емкости может быть указана реактивная мощность

$$Q_p = 2\pi f U_{раб}^2 C, \text{ вар.} \quad (2.1)$$

Зная значение реактивной мощности  $Q_p$ , рабочего напряжения  $U_{раб}$  и рабочей частоты  $f$ , из формулы (2.1) находим номинальную емкость конденсатора:

$$C = \frac{Q_p}{2\pi f U_{раб}^2}, \text{ Ф.} \quad (2.2)$$

Если конденсатор предназначен для работы на выпрямленном напряжении, то в этом случае в кривой напряжения будут две составляющие: постоянная и переменная. Переменная составляющая может вызвать заметный нагрев конденсатора, а также влиять на его ионизационные характеристики. Поэтому в задании должны быть оговорены частота и амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения.

Если конденсатор используется при импульсном напряжении, то необходимо указать форму и частоту следования импульсов.

Срок службы указывается в часах. Для импульсных конденсаторов обычно срок службы указывается в максимальном суммарном количестве импульсов, которое может воздействовать на конденсатор за все время его работы.

## 2.2. Характеристики основных материалов, применяемых в высоковольтных конденсаторах (обоснование выбора материалов)

В технике сильных токов и высоких напряжений, а также в энергетических установках для повышения коэффициента мощности, как уже отмечалось, используются конденсаторы с бумажной изоляцией, пропитанной минеральными или синтетическими жидкостями.

Для изготовления таких конденсаторов обычно используется конденсаторная бумага. Конденсаторная бумага отличается весьма малой толщиной (5 ÷ 30 мкм), высокой плотностью и небольшим содержанием неорганических загрязнений. Отечественная бумага выпускается двух видов: обычная конденсаторная бумага – КОИ и бумага с улучшенными диэлектрическими свойствами – СИЛКОН. Обычную бумагу изготавливают двух марок по плотности: КОИ-I ( $\varepsilon = 2,2$ ) плотностью 1 г/см<sup>3</sup> и КОИ-II ( $\varepsilon = 2,9$ ) плотностью 1,17–1,25 г/см<sup>3</sup>. Улучшенная бумага имеет три марки: СИЛКОН-0,8 ( $\gamma = 0,8$  г/см<sup>3</sup>); СИЛКОН-I ( $\gamma = 1$  г/см<sup>3</sup>) и СИЛКОН-2 ( $\gamma = 1,17$ –1,25 г/см<sup>3</sup>).

Пробивная напряженность непропитанной конденсаторной бумаги лежит в пределах 30–50 кВ/мм, возрастая с увеличением плотности и с уменьшением толщины. Для пропитанной конденсаторной бумаги  $E_{пр} = 200$ –250 кВ/мм. Однако с увеличением плотности бумаги увеличиваются диэлектрические потери. Поэтому менее плотную бумагу КОИ-I, для которой  $tgd = (13-15) \cdot 10^{-4}$ , обычно используют на переменном напряжении при  $U > 1$  кВ, а КОИ-II с  $tgd = (18-24) \cdot 10^{-4}$  – при постоянном напряжении и при переменном напряжении меньше 1 кВ, а также на импульсном напряжении. Для бумаги СИЛКОН величина  $tgd$  находится в пределах  $(10-20) \cdot 10^{-4}$ .

Для бумаги, пропитанной жидкими диэлектриками, диэлектрическая проницаемость определяется по формуле

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{\varepsilon_{\kappa}}{1 - X + X \cdot \frac{\varepsilon_{\kappa}}{\varepsilon_{\eta}}}, \quad (2.3)$$

где  $\varepsilon_{\kappa}$  – диэлектрическая проницаемость клетчатки ( $\varepsilon_{\kappa} = 6,5$ );

$\varepsilon_{\eta}$  – диэлектрическая проницаемость пропитки;  $X$  – объем пор в бумаге в относительных единицах (для КОИ-I,  $X = 0,35$ ; для КОИ-II,  $X = 0,22$ ).

В целях улучшения характеристик диэлектрика (повышения электрической прочности и напряжения начала частичных разрядов, уменьшения

диэлектрических потерь) в современных конструкциях конденсаторов используют комбинированную бумажно-пленочную изоляцию, в которой бумажные слои выполняют роль фитиля при пропитке. Применяются два основных вида синтетических пленок: неполярные (полистирол, полиэтилен, политетрафторэтилен, полипропилен) и полярные (ацетат целлюлозы, полиэтилентерефталат, поликарбонат).

Для комбинированной изоляции

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\delta} \varepsilon_{m}}{\varepsilon_{\delta} \frac{d_m}{d} + \varepsilon_m \frac{d_{\delta}}{d}}, \quad (2.4)$$

где  $\varepsilon_{\delta}$ ,  $\varepsilon_m$  - диэлектрическая проницаемость пропитанной бумаги и пленки, соответственно;  $d_{\delta}$ ,  $d_m$  - суммарная толщина бумаги и пленки в секции, соответственно;  $d$  - общая толщина комбинированной изоляции.

Для бумажно-пленочной изоляции

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_m}{1 + \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{\delta}} \left( \frac{1-X}{X} \right)} + \frac{\operatorname{tg} \delta_{\delta}}{1 + \frac{\varepsilon_{\delta}}{\varepsilon_m} \cdot \frac{X}{1-X}}, \quad (2.5)$$

где  $X = d_m/d$  - отношение суммарной толщины слоев пленки к общей толщине диэлектрика в секции.

В табл. 2.1 приведены основные характеристики некоторых видов пленок.

Большинство пленок имеет очень высокую электрическую прочность (на постоянном напряжении  $E_{np} = 300-400$  кВ/мм).

Применение бумажно-пленочной изоляции позволило повысить допустимые напряженности в импульсных конденсаторах до 150-200 кВ/мм.

Для увеличения электрической прочности и улучшения удельных характеристик конденсаторов используется пропитка конденсаторной бумаги жидкими или полужидкими диэлектриками. В табл. 2.2 приведены некоторые характеристики жидкостей, используемых в качестве пропитки конденсаторной изоляции.

Для изготовления корпусной изоляции и межсекционных прокладок используется кабельная бумага толщиной 5-240 мкм, электрокартон, гетинакс, текстолит, винипласт.

В качестве обкладок в конденсаторах чаще всего используется фольга из алюминия толщиной от 0,005 до 0,2 мм при ширине рулона от 10 до 460 мм. Для перемычек между секциями и для выводов конденсато-

Таблица 2.1

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Темп., °С	ε/ε <sub>0</sub> при T=20°С		γδ · 10 <sup>3</sup> при T=20°С		ρ <sub>v</sub> , Ом · см	E <sub>пр</sub> , кВ/мм
			1 кГц	1 МГц	1 кГц	1 МГц		
Полистирол (стиро- флекс)	1,05	-60 ± +85	2,6	2,6	0,2-0,3	0,2	10 <sup>19</sup> - 10 <sup>20</sup>	150-180
Полиэтилен	0,92	-60 ± +70	2,25	2,25	0,5	0,3	10 <sup>18</sup> - 10 <sup>19</sup>	100-160
Политетрафторэти- лен (фторопласт-4)	2,2	-60 ± +250	2,05	2,05	0,1-0,5	0,1-0,2	10 <sup>19</sup> - 10 <sup>20</sup>	150-220
Полипропилен	0,92	-20 ± +75	2,25	2,25	0,3-0,5	0,2-0,3	10 <sup>18</sup> - 10 <sup>19</sup>	100-120
Полиэтилентере- фталат (лавсан)	1,40	-60 ± +125	3,2	3,1	4 - 5	18-20	10 <sup>18</sup>	160
Диметилкарбонат	1,24	-20 ± +140	3,1	3,0	0,8-1,2	15	5 · 10 <sup>18</sup>	100-160

ра применяется медная фольга толщиной 0,3-0,5 мм.

Для изготовления щек, хомутов и корпусов конденсаторов используют отожженную и протравленную (для удаления окалины) тонколистовую сталь (1-2 мм), называемую декапированной. Толстолистовая сталь (14-16 мм) служит для производства крышек конденсаторов связи.

Таблица 2.2

Наименование диэлектрика	$\epsilon$	$tg \delta \times 10^4$	$\rho_v$ , Ом · см
Масло конденсаторное	2,1-2,2	1,2	$10^{13} + 3 \cdot 10^{13}$
Совол	4,1-4,8	5 + 10	$3 \cdot 10^{11} + 3 \cdot 10^{12}$
Нитросовол	7,5	5 + 10	$10^{11} + 10^{12}$
Касторовое масло	4,2-4,7	10 + 15	$2 \cdot 10^{10}$
"Калория-2" (жидкий полисилоксан)	2,2-2,4	2 - 5	$3 \cdot 10^{13}$
Вазелин	2,1-2,2	-	$5 \cdot 10^{12}$
Парафин	2,1-2,2	-	$3 \cdot 10^{12}$
Трихлорцифенил	5,5	-	$10^{11} + 10^{12}$
Фторированный эфир	6,1	2 - 5	$5 \cdot 10^{11} + 10^{12}$

Для изготовления конденсаторов в изоляционном корпусе используются фарфор, бакелит, капрон, винипласт, стеклопластик и другие материалы.

### 2.3. Выбор рабочей и испытательной напряженностей в диэлектрике конденсатора

Величина напряженности электрического поля в активном диэлектрике является одним из важнейших параметров, который в значительной мере определяет габариты и надежность конденсатора.

Расчет электрической прочности сводится к нахождению допустимых значений напряженности при длительном ( $E_{рад}$ ) и кратковременном ( $E_{исп}$ ) воздействии напряжения.

Выбор рабочей напряженности  $E_{рад}$  при длительном воздействии



напряжения производится обычно из таблиц, в которых обобщены результаты многолетней практики конструирования и эксплуатации конденсаторов с различными видами диэлектриков.

Значения рабочей напряженности электрического поля, используемые при расчетах различных типов конденсаторов, приведены в табл.2.3.

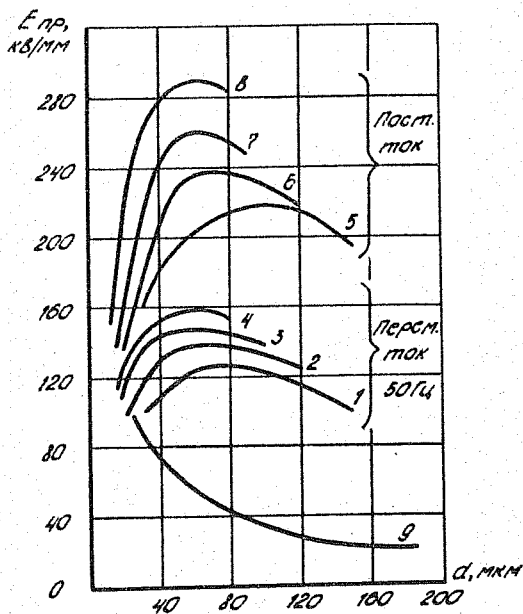
Таблица 2.3

Тип конденсатора	$E_{раб}$ , кВ/мм	Частота, Гц
Воздушный	0,5 ÷ 0,7	-
Газонаполненный (азот 15-20 ат)	1,3 ÷ 3,0	$10^5$
Вакуумный	3 ÷ 6	$10^6$
Маслонаполненный	1,3 - 1,5	$10^5$
Стекланный	25 - 30	постоянный ток
Керамический	1 - 2	
Бумажный с твердой пропиткой (в зависимости от толщины бумаги и числа слоев)	8 - 15	постоянный ток
Металло-бумажный однослойный	15 - 20	
Металло-бумажный многослойный	30 - 35	"-
Бумажный с жидкой пропиткой (четыре слоя бумаги)	30 - 35	"-
Бумажный косинусный при рабочем напряжении 1 кВ и выше ( $\alpha = 80$ мкм)	12 - 14	50
Бумажный печной с водяным охлаждением	4 - 9	$10^3 - 10^4$
Бумажный для включения в линии передачи	7,5 - 9	50
Бумажный для ГИИ	45 - 60	-
Бумажный для ГИГ	35 - 40	-
Полистирольный (два-три слоя пленки толщиной 0,02-0,03 мм)	12 - 17	постоянный ток

Из рис.2.1 следует, что при некоторой толщине диэлектрика  $d = d_{opt}$  электрическая прочность имеет максимальное значение ( $E_{прма}$ ), соответствующее некоторому оптимальному числу слоев бумаги  $N_{opt}$ , которое, в свою очередь, зависит от толщины одного слоя бумаги  $d$ . Поэтому для слоистого диэлектрика  $d_{opt} = N_{opt} d$ .

В конденсаторах, рассчитываемых на высокие напряжения, для более эффективного использования диэлектрика всю толщину изоляции делят на ряд последовательно включенных секций с толщиной диэлектрика

Зависимость напряженности возникновения частичных разрядов (9) и кратковременной электрической прочности от толщины бумажно-масляной изоляции из бумаги КОИ-П



1 и 5 -  $d = 15$  мкм; 2 и 6 -  $d = 12$  мкм; 3 и 7 -  $d = 10$  мкм;  
4 и 8 -  $d = 8$  мкм

Рис. 2.1

ка, равной  $d_{опт}$ . Толщина диэлектрика в секции может быть от 60-70 до 80-120 мкм, что соответствует 8-12 слоям при толщине слоя бумаги 10-12 мкм.

Выбрав оптимальную толщину изоляции, можно определить рабочее напряжение секции

$$U_{рабс} = E_{раб} \cdot d_{опт} \quad (2.6)$$

Для косинусных бумажно-масляных конденсаторов при  $E_{раб} = 12 - 14$  кВ/мм и толщине изоляции секции 60-70 мкм напряжение на секции в рабочем режиме должно быть в пределах 720-980 В. Рабочее напряжение

секции импульсного конденсатора при  $E_{раб} = 50-120$  кВ/мм и толщине диэлектрика 80-120 мкм составляет 5-10 кВ.

По известному значению  $E_{раб}$  определяют испытательную напряженность

$$E_{исп} = K_1 \cdot E_{раб}, \quad (2.7)$$

где  $K_1$  - коэффициент, учитывающий невыявленные дефекты при кратковременном испытании диэлектрика конденсатора ( $K_1 = 1,5-3,0$ ).

Затем проверяют, обеспечивает ли данное значение  $E_{исп}$  необходимую величину запаса электрической прочности

$$K_{зап} = \frac{E_{пр}}{E_{исп}}, \quad (2.8)$$

где  $E_{пр}$  - кратковременная электрическая прочность диэлектрика;

$$K_{зап} = 1,2-2,0.$$

Испытательное напряжение секции

$$U_{испс} = \frac{E_{пр}}{K_{зап}} \cdot d_{обр} = E_{исп} \cdot d_{обр}. \quad (2.9)$$

Допустимые рабочие напряженности в комбинированной изоляции целесообразно выбирать так, чтобы бумага, пропитанная жидким диэлектриком, работала при принятых для бумажной изоляции рабочих напряженностях.

Опыт эксплуатации конденсаторов с комбинированным диэлектриком ( $d = 60$  мкм) показывает, что допустимые  $E_{раб}$  могут быть приняты в бумажном компоненте, пропитанном трихлордифенилом, - 16-18 кВ/мм, в комбинированной изоляции (при суммарной толщине пленки равной 60-70% от общей толщины) - 30-37 кВ/мм, в пленке - 40-50 кВ/мм.

В современных конденсаторах с комбинированной изоляцией, пропитанной трихлордифенилом, при материалах высокого качества и высокой культуре технологии  $E_{раб} = 20-22,5$  кВ/мм ( $d = 50-60$  мкм). При этом обеспечивается ресурс примерно в 20 лет для 90% конденсаторов. Вследствие увеличения кратковременной прочности пленочной изоляции с уменьшением толщины рабочая напряженность может быть повышена при малых толщинах изоляции ( $d = 20-30$  мкм) на 20-50%.

При изменении толщины бумажно-масляной изоляции из конденсаторной бумаги КОН-I с толщиной листа 10-12 мкм допустимая рабочая напряженность может быть принята:

при пропитке минеральным маслом

$$E_{раб} = 3,3 \cdot d^{-0,58}, \text{ кВ/мм} \quad (2.10)$$

при пропитке трихлордифенилом

$$E_{раб} = 43 \cdot d^{-0,58}, \text{ кВ/мм} \quad (2.11)$$

где  $d$  - толщина диэлектрика, мм.

При окончательном выборе толщины изоляции в конденсаторной секции следует иметь в виду, что с увеличением толщины уменьшается напряженность возникновения частичных разрядов (рис.2.1).

Наличие ионизационных процессов в изоляции недопустимо, поэтому в целях увеличения долговечности конденсаторов рекомендуется выбирать толщину изоляции секции несколько меньше  $d_{онт}$ , что снижает кратковременную прочность, но улучшает ионизационные характеристики. Обычно эта толщина диэлектрика находится в пределах 50-70 мкм.

Выборанная рабочая напряженность должна обеспечивать отсутствие ионизационных процессов в диэлектрике.

При испытательном напряжении, вследствие кратковременности его приложения, допускаются частичные разряды малой интенсивности (начальная ионизация), но наличие критической ионизации является недопустимым. Надежность изоляции может быть обеспечена при выполнении условия  $E_{р.с} < E_n < E_{исп} < E_{кр}$ .

Напряженность начальных ч.р. на уровне  $3 \cdot 10^{-15} + 10^{-14} \text{ Кл}$  от толщины диэлектрика для бумаги КОН-I равна:

$$E_n = 3,6 d^{-0,5}, \text{ кВ/мм} \quad (2.12)$$

а зависимость напряженности критических ч.р. для бумаги КОН-I, пропитанной конденсаторным маслом или трихлордифенилом, имеет вид

$$E_{кр} = 9,5 d^{-0,5}, \text{ кВ/мм} \quad (2.13)$$

где  $d$  - толщина изоляции, мм ( $0,03 \leq d \leq 1,0$  мм).

Напряженности критических ч.р. для полипропиленово-бумажной (50% пленки) изоляции, пропитанной хлордифенилом, на 20% выше, а для полипропиленовой изоляции с пропиткой трихлордифенилом на 35% выше, чем для бумажной изоляции.

Амплитудное значение напряженности начальных и критических ч.р., измеренное при напряжении промышленной частоты, незначительно отличается от напряженности ч.р. при импульсном напряжении (слабозатухающий колебательный импульс).

Для бумажной изоляции, пропитанной минеральным маслом, зависимость напряженности ч.р. от толщины диэлектрика может быть представлена формулами: для начальных ч.р. на уровне  $10^{-12} \text{ Кл}$

$$E_n = 7,8 d^{-0,58}, \frac{\text{кВ/мм} \cdot \text{мм}}{\text{мм}}; \quad (2.14)$$

для критических ч.р.

$$E_{кр} = 14 d^{-0,58}, \quad \frac{\text{кВ max}}{\text{мм}}, \quad (2.15)$$

где  $d$  — толщина изоляции, мм.

Формулы (2.14-2.15) могут использоваться для оценки  $E_H$  и  $E_{кр}$  для бумажной изоляции, пропитанной трихлордифенилом или касторовым маслом.

Для бумажно-масляной изоляции силовых конденсаторов при 50 Гц можно использовать уравнение

$$\lg E_H = 2,65 - 0,5 \lg d, \quad \text{кВ/мм} \quad (2.16)$$

где  $d$  — в мкм.

При толщине изоляции 50-60 мкм величина  $E_H = 63-57$  кВ/мм; при  $d = 80-100$  мкм величина  $E_H$  снижается до 50-45 кВ/мм. Значение  $E_H$ , о котором здесь идет речь, представляет верхнюю границу напряженности начала ионизации. Поэтому при выборе значений  $E_{раб}$  для конденсаторов переменного напряжения надо выбирать коэффициент запаса по отношению к верхней границе  $E_H$  с таким расчетом, чтобы он превышал величину отношения возможных перенапряжений к  $E_{раб}$  в условиях эксплуатации конденсаторов, т.е.  $K \cdot E_{раб} \leq E_H$ , где  $K = 1,5$ .

Повысить величину напряженности начала ионизации можно путем использования повышенного давления над уровнем пропитывающей жидкости за счет заполнения бака конденсатора инертным скатым газом или путем использования повышенного давления пропитывающей жидкости.

#### 2.4. Расчет секции конденсатора

При использовании тонких диэлектриков, устанавливаемых в рулонах (конденсаторная бумага, пленка), для получения больших значений емкости применяется спиральная намотка (рис.2.2). В этом случае работают обе ленты диэлектрика и емкость конденсатора (конденсаторной секции)

$$C = 2 \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot S}{d} = 2 \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot b \cdot l}{d}, \quad (2.17)$$

где  $S$  — активная площадь обкладок ( $S = b \cdot l$ ), см<sup>2</sup>;  $d$  — толщина диэлектрика, см;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/см

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} = 0,00885 \cdot 10^{-11} \text{ Ф/см}.$$

### Конденсатор со спиральной намоткой

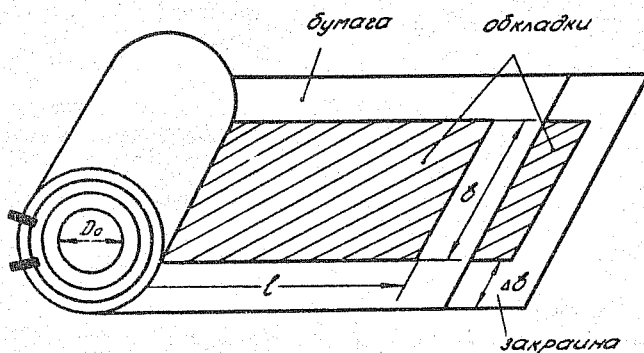


Рис. 2.2

Выражая емкость конденсатора в мкФ, получим

$$C = 0,177 \frac{\epsilon \beta \ell}{d} \text{, мкФ} \quad (2.18)$$

Для намотанной цилиндрической секции длина обкладки  $\ell = \pi n D_{\text{ср}}$ , где  $n$  — число витков,  $D_{\text{ср}} = \frac{D_0 + D_n}{2}$  — средний диаметр, см;  $D_0$  и  $D_n$  — внутренний диаметр (диаметр оправки) и наружный диаметр секции, соответственно.

Секции со спиральной намоткой широко используются при изготовлении высоковольтных силовых конденсаторов.

Определив рабочее напряжение секции  $U_{\text{рабс}}$  на основании вышеизложенных расчетов по выбору допустимых напряженностей поля, необходимо определить количество секций, емкость секций и их геометрические размеры.

Число последовательных секций определяется по формуле

$$N = \frac{U_{\text{рабд}}}{U_{\text{рабс}}} \quad (2.19)$$

Емкость секции при последовательном включении

$$C_c = N C, \quad (2.20)$$

где  $C$  — номинальная емкость конденсатора. Этот параметр может быть задан или определяется из формулы (2.2).

Для высоковольтных конденсаторов емкость отдельной секции не должна превышать 1,5-2,5 мкФ, поэтому число параллельно включенных секций  $M$  в каждой последовательной группе определится из формулы

$$M = \frac{C_c}{1,5 + 2,5} = \frac{N \cdot C}{1,5 + 2,5} \quad (2.21)$$

При комбинированном соединении  $M$  параллельных секций в каждой из последовательных групп

$$C_c = \frac{N \cdot C}{M} \quad (2.22)$$

Геометрические размеры секций во многом определяются емкостью секций, формой и размерами корпуса, шириной бумаги и некоторыми другими факторами.

Активная площадь обкладок секции со спиральной намоткой

$$S = 567 \frac{C_c \cdot d}{\varepsilon} \text{ , см}^2 \text{ ,} \quad (2.23)$$

где  $d$  - расчетное значение толщины изоляции в секции, мкм;  $C_c$  - емкость секции, мкФ.

Затем выбирается желательная длина секции  $l_c$ , которая равна ширине бумаги, а по ней определяется ширина фольги  $b$  (рис.2.3):

$$l_c = b + 2\Delta b + \delta \text{ , мм} \quad (2.24)$$

где  $b$  - ширина фольги, мм;  $\Delta b$  - ширина закраины, мм;  $\delta$  - допустимая величина смещения бумаги на две стороны (при ширине бумаги  $h_f = 280$  мм,  $\delta = 3-5$  мм; при  $h_f = 140$  мм,  $\delta = 2-3$  мм).

Ширина закраины  $\Delta b$  выбирается из условия равной электрической прочности на пробой по толщине диэлектрика и перекрытия по закраине между обкладками (рис.2.3).

Применение намотки с выступающей фольгой (рис.2.4,а) позволяет соединить все витки фольги с торцовых сторон секции и уменьшить индуктивность секции (безиндукционная намотка).

Для секций со скрытой фольгой (рис.2.4,б) ширина фольги выбирается несколько уже ширины бумаги на удвоенную величину закраины  $\Delta b$ , которая для силовых конденсаторов с бумажно-масляной изоляцией составляет 7-10 мм.

Из (2.24) имеем

$$b = l_c - 2\Delta b - \delta \quad (2.25)$$





Длина лент фольги

$$l = \frac{S}{\beta} \quad (2.26)$$

Для косинусных конденсаторов применяется обычно фольга толщиной 7-8 мкм.

Площадь сечения торца развернутой конденсаторной секции со стороны длины ленты (рис.2.3,а) будет равна

$$F = 2(d + d_{\varphi})l, \text{ см}^2, \quad (2.27)$$

где  $d$  и  $d_{\varphi}$  - толщина изоляции и фольги, соответственно.

Площадь торца плоскопрессованной секции равна

$$F = \beta'_c \cdot \Delta C = \left( \frac{\pi D_o}{2} + \Delta C \right) \Delta C, \text{ см}^2, \quad (2.28)$$

где  $D_o$  - диаметр оправки, см;  $\Delta C$  - высота секции, см;  $\beta'_c$  - ширина секции до прессования, см. Наиболее часто применяются оправки диаметром 5-10 см.

При заданном значении  $F$  диаметр оправки  $D_o$  определяет геометрические размеры секции, т.е. соотношение  $\beta'_c$  и  $\Delta C$ . Задав один из этих размеров, например,  $\Delta C$  ( $\Delta C = 8-15$  мм), можно найти второй из них, исходя из равенства выражений (2.27) и (2.28), а также диаметр  $D_o$ .

Действительная ширина секции в спрессованном виде  $\beta_c$  не будет равна  $\beta'_c$ , поэтому

$$\beta_c = \frac{\pi D_o}{2} + \frac{\Delta C}{K_n} + \beta_l, \quad (2.29)$$

где  $K_n$  - коэффициент запрессовки ( $K_n = 0,8-0,95$ ),  $\beta_l$  - допуск на отклонение ширины секции ( $\beta_l = 1-3$  мм).

Определив высоту секции  $\Delta C$ , можно найти число витков секции из выражения

$$n = \frac{\Delta C}{4(d + d_{\varphi})} \quad (2.30)$$

К расчетному числу витков  $n$  необходимо добавить 1-2 витка в случай механического повреждения при технологических операциях.

## 2.5. Конструирование пакета секций. Расчет корпусной изоляции

По расчетным значениям размеров секций конденсатора определяются размеры пакета секций. Секции в пакете следует располагать таким образом, чтобы получить форму плоского параллелепипеда (рис.2.5).

Вертикальное расположение секций в пакете конденсатора (вариант)

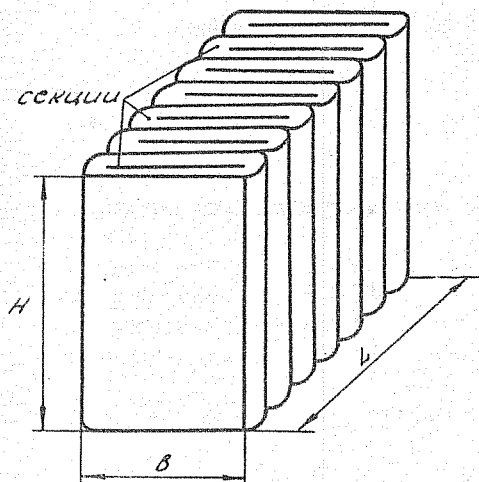


Рис.2.5

Такое расположение секций ( $B \ll L$ ) существенно будет облегчать работу конденсатора в рабочем режиме за счет улучшения теплоотвода со стороны боковых стенок конденсатора.

В целях предотвращения пробоя между последовательно включенными секциями (или группами секций) помещают дополнительную изоляцию (например, кабельную бумагу). Как правило, изоляцию между секциями рассчитывают исходя из величины  $U_{исп}$ . Из соображений механической прочности эта изоляция имеет увеличенную толщину, что обеспечивает большой запас электрической прочности.

При использовании металлических корпусов секции или пакеты секций должны быть надежно изолированы от корпуса.

При напряжении меньше 1000В корпусная изоляция выбирается из соображений механической прочности (для защиты секций от повреждений при монтаже в корпусе).

При более высоких напряжениях толщина корпусной изоляции выбирается по формуле

$$d_k = K \cdot \frac{U_{исп}}{E_{np}} + \delta, \text{ мм}, \quad (2.31)$$

где  $U_{исп}$  - испытательное напряжение между выводами конденсатора и корпусом, кВ;  $E_{np}$  - кратковременная прочность материала, выбранного

для корпусной изоляции, кВ/мм;  $K$  - коэффициент запаса, который зависит от типа конденсатора и выбранного диэлектрика ( $K = 1,5 + 2,0$ );  $\delta$  - толщина дополнительного слоя изоляции для учета возможного механического повреждения при сборке конденсатора, мм.

Следует помнить, что слишком большая толщина корпусной изоляции может ухудшить условия теплоотвода и тем самым увеличить перегрев конденсатора.

При использовании в качестве корпусной изоляции кабельной бумаги KB-12 необходимое число листов выбирается по табл.2.4.

Таблица 2.4

$U_{исп}$ , кВ		Число листов при $K = 2$	Рекомендуемое число листов
50 Гц	постоянное		
2,5	5,0	3 - 4	4
6,0	12,0	5	5
18,0	36,0	8 - 9	9
25,0	50,0	10 - 11	11
35,0	70,0	15 - 16	15

Для силовых конденсаторов ( $f = 50$  Гц) изоляцию от корпуса необходимо выбрать так, чтобы минимальное  $U_{исп}$  было выше на 20% сухоразрядного напряжения изоляторов, используемых в данном конденсаторе.

В табл.2.5 приведена электрическая прочность картона марки ЭМ и ЭМВ, пропитанных маслом (при 50 Гц).

Таблица 2.5

Толщина, мм	$E$ , кВ/мм
0,5	47,0
1,0	34,0
2,0	26,0
3,0	19,0

Габаритные размеры пакета секций с корпусной изоляцией определяются по формулам:

высота пакета секций

$$H = l_c + 2d_k, \text{ мм}, \quad (2.32)$$

ширина пакета секций,

$$B = b_c + 2d_k, \text{ мм} \quad (2.33)$$

длина пакета секций

$$L = n \cdot \Delta C + \delta_i + 2d_k, \text{ мм}. \quad (2.34)$$

где  $l_c$ ,  $b_c$  и  $\Delta C$  - длина, ширина и высота секции;  $n$  - число последовательно расположенных секций в пакете;  $\delta_i$  - суммарная толщина изоляции между секциями.

Определив габаритные размеры пакета секций, окончательно выбирают размеры бака конденсатора, предусмотрев при этом зазор между пакетом и баком (2-3 мм) для облегчения технологических операций при помещении пакета в бак. При этом необходимо учесть толщину стяжных шек и комутот. Окончательно высота бака конденсатора должна выбираться с учетом длины нижней части проходного изолятора. Иногда приходится ориентироваться на уже имеющиеся в производстве размеры корпусов и мириться с неполным заполнением корпуса секциями конденсатора.

Конденсаторы с изоляционным корпусом изготавливают без корпусной изоляции, т.к. ее роль выполняет изоляционный корпус.

## 2.6. Выбор проходных изоляторов

Проходные изоляторы, применяемые для конденсаторов, должны выдерживать электрические, механические, тепловые и атмосферные воздействия.

При расчете и конструировании изоляторов необходимо выдерживать соотношение  $U_{пр} \geq 1,3 U_{пер}$ , где  $U_{пер}$  - напряжение перекрытия изоляторов. Для изготовления изоляторов используется фарфор и стекло. Изоляторы могут быть со сплошной изоляцией или с полостью, которая может быть заполнена изоляционной жидкостью, используемой в качестве пропитки.

Исходными данными для расчета изоляторов являются величины номинального (рабочего), испытательного  $U_{исп}$ , суховыдерживаемого  $U_{схв}$  и мокровыдерживаемого  $U_{мв}$  напряжений (табл. 2.6).

Данные табл. 2.6 относятся к изоляторам, испытываемым в отдельности. В конструкции конденсатора изоляторы подвергаются действию меньших испытательных напряжений, в результате чего дополнительно повышается запас электрической прочности.

Высота фарфорового изолятора с гладкой или волнистой поверхностью, предназначенного для работы в закрытом помещении при переменном напряжении частотой  $f = 50$  Гц, определяется из формулы:

$$U_{схв} = 6 + 2,5/h, \text{ кВ}, \quad (2.35)$$

где  $h$  - высота изолятора, см.

Для изоляторов с ребристой поверхностью

$$U_{схв} = 30 + 2,9/h, \text{ кВ}. \quad (2.36)$$

Таблица 2.6

## Испытательные напряжения при частоте 50 Гц

Номинальное напряжение, кВ	3	6	10	15	20	35
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	3,5	6,9	11,5	17,5	23	40,5
Одноминутное испытательное напряжение $U_{исп}$ , кВ	25	32	42	57	68	100
Суховыдерживаемое напряжение при плавном подьеме $U_{схв}$ , кВ	27	36	47	63	75	110
Мокровыдерживаемое напряжение, кВ	20	26	34	45	55	85

Высота изоляторов наружной установки может быть определена из формулы

$$U_{нв} = 2,15/h, \text{ кВ} \quad (2.37)$$

Длина нижней части изолятора, находящейся в масле, выбирается из условия, что при разрядном напряжении средняя разрядная напряженность не превышает 6,5-7,0 кВ/см. Обычно нижняя часть составляет приблизительно половину высоты изолятора в воздухе.

Количество ребер и их параметры рассчитываются по методике, изложенной в разделе 1.2.4.

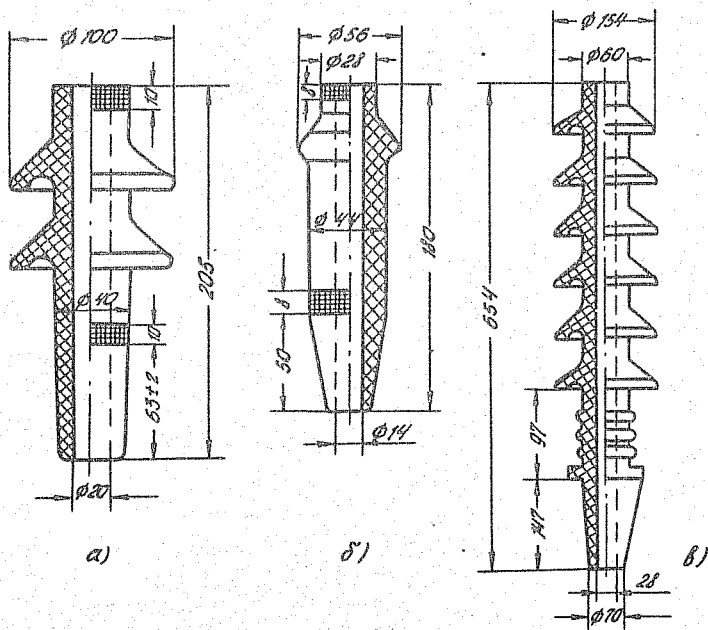
Расчет сплошных фарфоровых изоляторов (рис.2.6) ведется в направлении определения толщины стенки изолятора, обеспечивающей необходимый запас электрической и механической прочности при заданных воздействующих факторах.

Для фарфора среднего качества  $U_{пр} = 80 \sqrt{S}$ , кВ ( $S$  - толщина фарфора, см), где  $U_{пр} = 1,6 U_{схв}$ .

Для импульсных конденсаторов за расчетное напряжение следует выбирать испытательное напряжение  $U_{исп} = (1,2-1,5) U_{н}$ .

Аксиальные размеры изоляторов с полостью (рис.2.7) находятся по вышеизложенной методике, а размеры изолятора в радиальном направлении должны обеспечить выполнение условия  $E_{max} \leq E_{ог}$ , где  $E_{max}$  - максимальная напряженность поля в полости (на токоведущем стержне)

### Преходные изоляторы для конденсаторов



а - типа ИФН-6 для наружной установки; б - типа ИФВ-6 для внутренней установки; в - для импульсного конденсатора  
 $U_H = 100$  кВ

Рис. 2.6

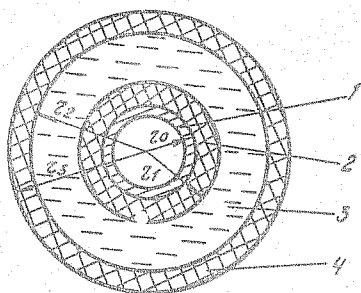
$$E_{max} = \frac{U}{\tau_1 \cdot \varepsilon_2 \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{\tau_1}{\tau_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{\tau_2}{\tau_0} + \frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{\tau_3}{\tau_2} \right)}, \quad (2.38)$$

где  $U$  - расчетное напряжение ( $U = I, I U_{ср}$ );  $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3$  - радиусы токоведущего стержня, изоляционного покрытия, полости и фарфора, соответственно;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  - диэлектрические проницаемости изоляционного покрытия, изоляции полости и фарфора, соответственно.

Для минерального масла

$$E_{доп.н} = \frac{E_{гр.н}}{1,3-1,5},$$

Сечение проходного  
изолятора с полостью



- 1 - токоведущий стержень;  
2 - изоляционное покрытие из  
бумаги; 3 - полость; 4 -  
фарфор

Рис. 2.7

## 2.7. Тепловой расчет конденсатора

Электрический расчет, основанный на выборе  $E_{пр\delta}$  из условия недопустимости ионизационных процессов в диэлектрике, необходимо дополнить тепловым расчетом.

Целью теплового расчета является определение максимальной температуры нагрева конденсатора и перегрева его по отношению к температуре окружающей среды.

Для предотвращения теплового пробоя конденсатора необходимо выбрать диэлектрик с малыми потерями (проводимостью), предусматривать форсированное охлаждение конденсатора, устройство охлаждающих ребер, избегать больших толщин изоляции от корпуса.

Для определения температуры нагрева конденсатора необходимо определить суммарные потери тепла в диэлектрике ( $P_D$ ) и в металлических частях конденсатора ( $P_M$ ), т.е.  $P_A = P_D + P_M$

Потери энергии в изоляции секции конденсатора

$$P_{Dc} = 2\pi f C_c U_{пр\delta c}^2 \operatorname{tg} \delta \quad , \text{ Вт} \quad (2.39)$$

где  $E_{пр\delta} = 100-120$  кВ/см.

Для уменьшения габаритов проходных изоляторов в конденсаторах с металлическим корпусом на большие номинальные напряжения рекомендуется выполнять крышку конденсатора из диэлектрика (текстолита, гетинакса).

В конденсаторах с изоляционным корпусом вместо проходных изоляторов используются металлические шпильки - выводы, расположенные в верхней крышке.

Для исключения разрядов между выводами конденсатора по воздушной (конденсаторы с металлическим корпусом) или по поверхности изоляционной крышки рекомендуется устанавливать между ними изоляционные барьеры из текстолита, стеклотекстолита, винипласта.

где  $C_c$  - емкость секции, мкФ;  $U_{рабс}$  - рабочее напряжение секции, кВ;  
 $f$  - частота, Гц.

Суммарные потери в диэлектрике конденсатора

$$P_d = Z P_{dc} \quad , \text{ Вт} . \quad (2.40)$$

где  $Z$  - общее число секций в конденсаторе.

Полные потери в обоях обкладках одной секции конденсатора при расположении вкладных контактов в начале и в конце намотки

$$P_c = \frac{2}{3} I_c \cdot \rho \cdot \frac{\ell}{b \cdot d_p} \quad , \text{ Вт} . \quad (2.41)$$

где  $\rho$  - удельное объемное сопротивление материала обкладки, Ом·см;  
 $d_p$  - толщина фольги, см;  $\ell$  и  $b$  - длина и ширина обкладки, см.  
 Ток секции через обкладки  $I_c = 2 \pi f U_{рабс} \cdot C_c \cdot 10^{-3}$ , А .

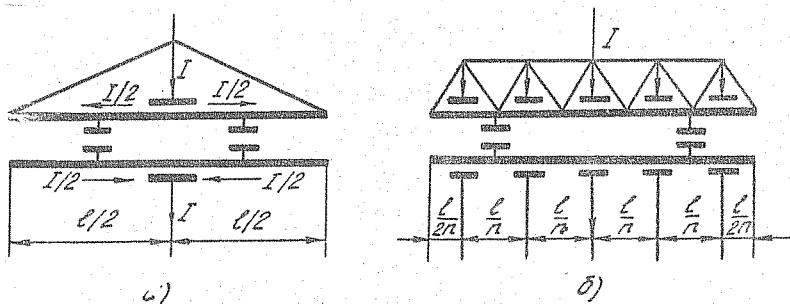
где  $U_{рабс}$  - в кВ;  $C_c$  - в мкФ.

Суммарные потери в обкладках конденсатора

$$P_o = Z \cdot P_c \quad , \text{ Вт} . \quad (2.42)$$

Для уменьшения потерь в обкладках рекомендуется располагать вкладные контакты в середине намотки (рис.2.8,а) или использовать несколько пар вкладных контактов (рис.2.8,б)

#### Схемы расположения вкладных контактов



- а - одна пара выводов в середине обкладок;
- б - несколько пар выводов

Рис.2.8

При расположении вкладных контактов по рис.2.8,а



$$\rho_c = \frac{1}{6} I_c^2 \rho \frac{\ell}{b \cdot d \varphi}, \quad (2.43)$$

при расположении контактов по рис. 2.8, б

$$\rho_c = \frac{1}{6} I_c^2 \rho \frac{\ell}{n^2 \cdot b \cdot d \varphi}, \quad (2.44)$$

где  $n$  - число пар контактов.

При большой величине тока конденсатора или при больших длинах выводов следует учитывать потери в выводах

$$\rho_f = I_K^2 \rho \frac{\ell}{S}, \quad \text{Вт}, \quad (2.45)$$

где  $I_K$  - ток конденсатора, А;  $\rho$  - удельное объемное сопротивление материала вывода, Ом·см;  $\ell$  - длина выводов, см;  $S$  - площадь сечения выводов, см<sup>2</sup>.

Суммарные потери в конденсаторе (мощность потерь)

$$\rho_A = \rho_\theta + \rho_o + \rho_f = \rho_\theta + \rho_M, \quad \text{Вт}. \quad (2.46)$$

Для силовых бумажно-масляных конденсаторов (рис. 2.9, а) максимальную температуру внутри конденсатора (внутри пакета секций) можно определить по формуле Мантрова.

$$t_{max} = t_o + \frac{0,24 \rho_A K}{\lambda_T \cdot S_{охл}} + 0,03 \gamma E^2 \left[ \frac{2\theta \Delta C - \Delta C^2}{\lambda_I} + \frac{(b - \Delta C)^2}{\lambda_{II}} \right], \quad (2.47)$$

где  $\rho_A$  - суммарные потери, Вт;  $\lambda_T$  - коэффициент теплоотдачи с поверхности конденсатора, кал/с·см<sup>2</sup>·град ( $\lambda_T = 0,3 \cdot 10^{-3}$  кал/с·см<sup>2</sup>·град);  $S_{охл}$  - боковая поверхность охлаждения, см<sup>2</sup>;  $t_o$  - температура окружающей среды, °С;  $\gamma$  - активная проводимость диэлектрика, Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>.

$$\gamma = 0,55 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta;$$

$f$  - частота, Гц.

$\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  - диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь диэлектрика при рабочей температуре конденсатора.

Если высота корпуса  $H$ , длина  $L$  и ширина  $B$ , то

$$S_{охл} = 2H(L + B).$$

К расчету максимальной температуры внутри  
бумажно-масляного конденсатора

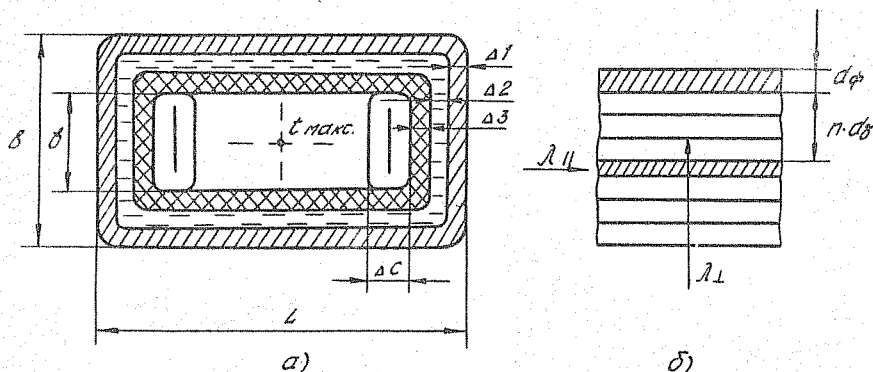


Рис. 2.9

$E$  - рабочая напряженность поля в диэлектрике конденсатора, В/см;  
 $b$  и  $\Delta C$  - ширина и высота конденсаторной секции, см;  $\lambda_1$  и  $\lambda_{11}$  -  
коэффициенты теплопроводности конденсаторной секции в направлении  
перпендикулярном и параллельном слоям бумаги, кал/с·см·град.

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_\delta \cdot \lambda_\phi (n \cdot d_\delta + d_\phi)}{\lambda_\phi \cdot n \cdot d_\delta + \lambda_\delta \cdot d_\phi}, \quad (2.48)$$

$$\lambda_{11} = \frac{\lambda_\delta \cdot n \cdot d_\delta}{n \cdot d_\delta + d_\phi} + \frac{\lambda_\phi \cdot d_\phi}{n \cdot d_\delta + d_\phi}, \quad (2.49)$$

где  $\lambda_\phi$ ,  $\lambda_\delta$  - коэффициенты теплопроводности фольги и бумаги,  
кал/с·см·град;  $d_\phi$ ,  $d_\delta$  - толщина фольги и одного слоя бумаги, см;  
 $n$  - число слоев бумаги между обкладками секции.

$$K = 1 + \alpha_T \left( \frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta_3}{\lambda_3} \right), \quad (2.50)$$

где  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  - толщина стенки корпуса, прослойки масла и изоляции  
от корпуса, соответственно, см;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  - коэффициент тепло-

проводности стенки корпуса, прослойки масла и изоляции от корпуса, соответственно, кал/с·см·град.

Значения коэффициентов теплопроводности различных материалов приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Материал	Коэффициент теплопроводности	
	Вт/см·град	Кал/с·см·град
Бакелит намотанный	0,0003	0,00007
Полистирол	0,0008	0,00019
Полихлорвинил	0,0009	0,00022
Полиэтилен	0,003	0,00072
Фторопласт-4	0,0025	0,0006
Бумага, пропитанная соевым	0,0016	0,00030
Бумага, пропитанная маслом	0,0017	0,00041
Электрокартон (пропитанный)	0,0017	0,00041
Гетинакс	0,0017	0,00041
Совол	0,001	0,00024
Масло минеральное	0,0015 - 0,002	0,00036 - 0,00048
Фарфор	0,01	0,0024
Сталь	0,586	0,141
Алюминиевая фольга	2,0	0,48
Медь	3,93	0,945

Для конденсаторов с бумажно-масляной изоляцией максимально допустимая температура составляет 65-70°C, а для конденсаторов с пропиткой хлордифенилами или касторовым маслом 90-95°C, что соответствует максимально допустимому перепаду между центральной точкой пакета секций и окружающей средой 30°C и 55°C, соответственно, при температуре окружающей среды 35-40°C.

### 2.8. Удельные характеристики конденсатора

Для оценки правильности расчета и конструирования конденсатора необходимо определить удельные характеристики.

Удельная емкость конденсатора

$$C_{уд} = \frac{C}{V}, \text{ мкФ/см}^3, \quad (2.51)$$

где  $C$  - емкость конденсатора, мкФ;  $V$  - объем активного диэлектрика в конденсаторе, см<sup>3</sup> ( $V = S \cdot d$ , где  $S$  - площадь обкладок, см<sup>2</sup>;  $d$  - суммарная толщина диэлектрика всех секций конденсатора, см).

Величина  $C_{уд}$  используется для оценки качества низковольтных конденсаторов. Для танталовых электролитических конденсаторов при  $U_{раб} = 4-6$  В достигнута удельная емкость более 100 мкФ/см<sup>3</sup>.

Удельная энергия конденсатора

$$\omega_{уд} = \frac{W}{V}, \quad \text{Дж/дм}^3, \quad (2.52)$$

где  $W$  - энергия, запасаемая в конденсаторе, Дж;

$$W = \frac{C U^2}{2}, \quad (2.53)$$

$C$  - в Ф;  $U$  - в В.

Значение  $\omega_{уд}$  используется для оценки качества конденсаторов высокого напряжения. В бумажно-масляных конденсаторах удельная энергия достигает 90 Дж/дм<sup>3</sup>. Для бумажно-плёночных конденсаторов, работающих в режиме колебательного разряда  $\omega_{уд} = 100-150$  Дж/дм<sup>3</sup>, а в режиме аперодического разряда  $\omega_{уд} = 200 - 500$  Дж/дм<sup>3</sup>.

Для оценки качества конденсаторов с большой реактивной мощностью используют величину удельной реактивной мощности

$$P_{уд} = \frac{P_p}{V}, \quad \text{квар/дм}^3. \quad (2.54)$$

Реактивная мощность

$$P_p = 2\pi f U^2 C, \quad \text{вар},$$

где  $U$  - в В;  $C$  - в Ф;  $f$  - в Гц.

Удельная реактивная мощность силовых (косинусных) бумажных конденсаторов достигает 3,7 квар/дм<sup>3</sup>, а для электротермических конденсаторов типа ЭСВ и ЭСВН от 4,9 до 20,8 квар/дм<sup>3</sup>.

Полученные расчетные значения удельных характеристик конденсатора необходимо сравнить с известными литературными или заводскими данными. Это дает возможность конструктору оценить разрабатываемый конденсатор и принять, при необходимости, дополнительные технические решения, направленные на снижение веса и объема конденсатора, совершенствование его конструкции.

### 3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИЗОЛЯЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Импульсные конденсаторы используются в испытательных установках для получения импульсных токов и напряжений, в электротехнологических и электрофизических установках, в лазерной и локационной технике, в мощных источниках света.

К импульсным конденсаторам предъявляются высокие требования. Они должны обладать большим запасом энергии в единице объема, иметь малую внутреннюю индуктивность, хорошую добротность и высокую динамическую устойчивость. Кроме этого они должны иметь большой срок службы.

Принципиально расчет импульсных конденсаторов может быть проведен по вышеизложенной методике. Учитывая, что условия работы импульсных конденсаторов отличаются от условий работы других силовых конденсаторов (например, косинусных), необходимо при расчете учитывать некоторые особенности, изложенные ниже.

3.1. Если конденсаторы работают в установках с большой частотой следования (несколько разрядов в 1 с и выше), то необходимо учитывать возможность теплового пробоя.

При аperiodических импульсах потери в диэлектрике конденсатора можно определить путем замены отдельных участков импульса "отрезками" синусоидального напряжения. Нарастающий и спадающий участки импульса заменяются синусоидальным напряжением с периодом, в четыре раза превышающим длительность нарастания или спада, и максимальной амплитудой  $U_m$ , равной максимальному значению импульса. Плоский участок на вершине импульса заменяется постоянным напряжением, не влияющим на величину диэлектрических потерь в диэлектрике конденсатора.

В этом случае потери определятся

$$\begin{aligned} P_d &= \frac{U_m^2}{2} cZ, (\omega_\varphi \tau_\varphi \operatorname{tg} \delta_\varphi + \omega_c \tau_c \operatorname{tg} \delta_c) = \\ &= \frac{\pi U_m^2}{4} cZ, (\operatorname{tg} \delta_\varphi + \operatorname{tg} \delta_c) \end{aligned} \quad \text{Вт} \quad (3.1)$$

где  $U_m$  - амплитуда приложенного напряжения, В;

$\omega_\varphi = \frac{2\pi}{4\tau_\varphi}$  - угловая частота, соответствующая фронту импульса с длительностью  $\tau_\varphi$ ;  $\omega_c = \frac{2\pi}{4\tau_c}$  - угловая частота, соответствующая спаду импульса с длительностью  $\tau_c$ ;  $\operatorname{tg} \delta_\varphi$  и  $\operatorname{tg} \delta_c$  - тангенс угла диэлектрических потерь при частотах  $f_\varphi = \frac{\omega_\varphi}{2\pi}$  и  $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$ ;

$Z$ , - число разрядов конденсатора в секунду;  $C$  - емкость конденса-  
тора, ф.

Если на конденсатор воздействует несинусоидальное напряжение, то при определении потерь используется принцип наложения. В этом случае несинусоидальное напряжение при помощи ряда Фурье разлагается на сумму гармонических составляющих. При этом считается, что постоянная составляющая разложения в ряд Фурье потерь не создает.

Потери в диэлектрике в этом случае можно определить по формуле

$$P_{\partial} = \sum_{K=1}^{K=N} P_{\partial K} = \sum_{K=1}^{K=N} \frac{1}{2} U_{mK}^2 \omega_K C_K \operatorname{tg} \delta_K, \quad (3.2)$$

где  $P_{\partial K}$  - потери в диэлектрике от  $K$ -й гармоники;  $U_{mK}$  и  $\operatorname{tg} \delta_K$  - амплитуда напряжения и  $\operatorname{tg} \delta$  на  $K$ -й гармонике;  $C_K$  - емкость, измеренная на  $K$ -й гармонике с частотой  $\omega_K$ .

Если несинусоидальное напряжение представляет собой последовательное чередование зарядов и разрядов конденсатора, длительность которых одного порядка, ряд Фурье будет быстро сходящимся.

Если же длительность заряда существенно превышает длительность разряда, то расчеты являются сложными, т.к. ряд Фурье имеет плохую сходимость. В этом случае предлагается упрощенная методика расчета, согласно которой последовательность таких импульсов можно представить в виде двух самостоятельных последовательностей, составленных из одинаковых по длительности процессов. Сущность этого метода поясняется рис. 3.1. К каждой из последовательностей (длительный заряд-разряд и кратковременный заряд-разряд) можно применить разложение в ряд Фурье, получив быстроходящиеся ряды, позволяющие легко вычислять потери.

При оценке потерь для пилообразных импульсов (рис. 3.2, а) можно использовать формулу

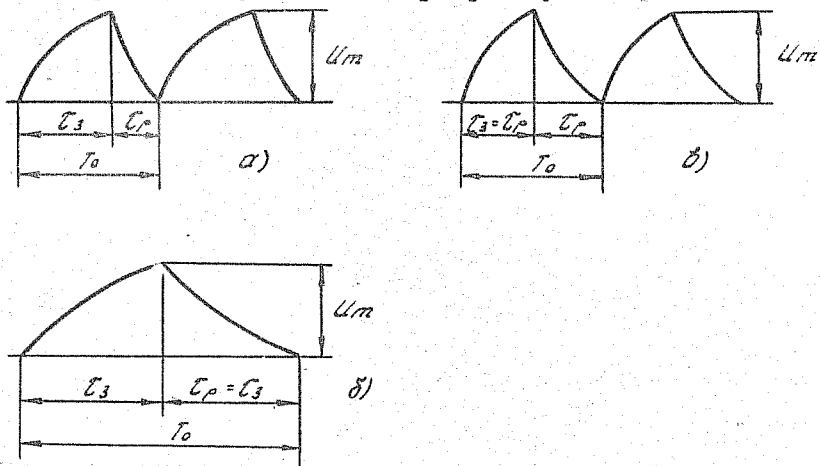
$$P_{\partial} = \frac{U_m^2 \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}{8} \cdot \frac{0,049 \tau_u}{\tau_c}, \quad (3.3)$$

где  $\omega = \frac{2\pi}{\tau_u}$ , а значение  $\tau_u$  и  $\tau_c$  соответствуют обозначениям на рис. 3.2, а.

Для трапецидальных импульсов (рис. 3.2, б)  $\omega = \frac{2\pi}{\tau_u}$ ,

$$P_{\partial} = \frac{U_m^2 \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}{8 \tau_u^2} \cdot \frac{0,78 \tau_u^2}{\left(1 - \frac{\tau_u - \tau_{\phi} - \tau_c}{\tau_u}\right)^2}, \quad (3.4)$$

К расчету потерь в конденсаторе при импульсном режиме



а -длительный заряд и кратковременный разряд; б-длительный заряд и длительный разряд; в-кратковременный заряд и кратковременный разряд

Рис. 3.1

Формы импульсов напряжения

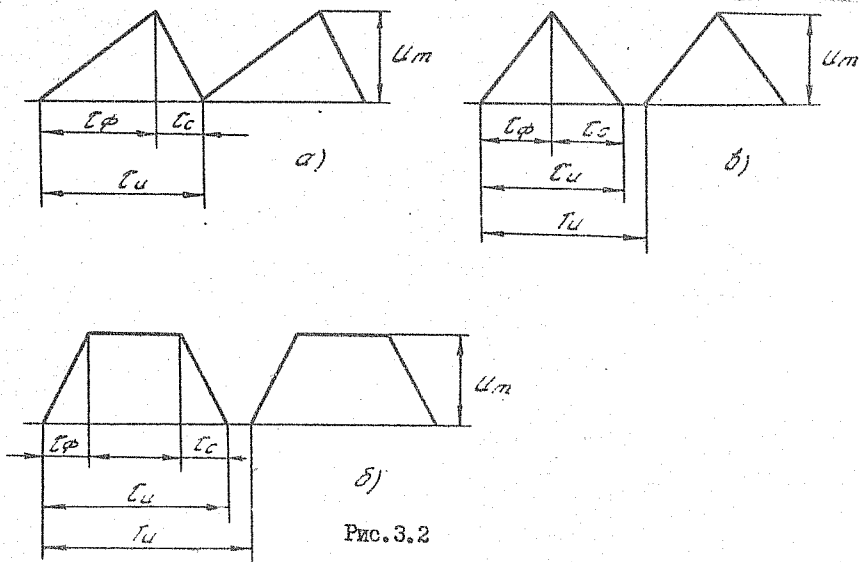


Рис. 3.2

Для треугольных импульсов (рис. 3.2, в)  $\omega = \frac{2\pi}{T_u}$ ,

$$P_d = \frac{U_m^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}{8 T_u^2} \cdot 0,78 T_u^2 \quad (3.5)$$

Значения  $\operatorname{tg} \delta$  в этих формулах следует принимать для частоты, соответствующей частоте следования импульсов.

3.2. В установках для получения больших импульсных токов потери в обкладках конденсаторов могут быть соизмеримы, а в ряде случаев и превосходить потери в диэлектрике. При этом необходимо учитывать неравномерность распределения тока по сечению токоведущих частей (токоведущие шины, выводы конденсатора) вследствие поверхностного эффекта.

3.3. Когда тепловой режим не является определяющим, величина  $E_{\text{раб}}$  импульсных конденсаторов выбирается из допустимого разрушения изоляции частичными разрядами.

Использование тонких слоев изоляции 30–100 мкм позволяет существенно повысить характеристики частичных разрядов и применять в импульсных конденсаторах повышенные  $E_{\text{раб}}$ .

Особенно благоприятное влияние на увеличение рабочей напряженности оказывает пропитка диэлектрика хлорированными жидкими диэлектриками или касторовым маслом вследствие их повышенной стойкости к частичным разрядам и более высоких значений  $\epsilon$  по сравнению с конденсаторным маслом.

Так, например, для бумаги КОН-П, пропитанной касторовым маслом или хлорированными жидкими диэлектриками, для срока службы не менее  $10^4$  разрядов  $E_{\text{раб}}$  может быть принята 80 кВ/мм. При сроке службы не менее  $10^3$  разрядов допустимая рабочая напряженность для этой изоляции может быть увеличена до 100–120 кВ/мм, что позволяет уменьшить габариты, вес и стоимость конденсатора.

По данным Г.С.Кучинского, пробивная напряженность для КОН-П при сроке службы  $10^4$  импульсов для толщины изоляции 80 мкм при пропитке конденсаторным маслом составляет 85 кВ/мм, а при пропитке касторовым маслом — 110 кВ/мм. Учитывая, что диэлектрическая проницаемость второй изоляции в 1,4–1,5 раза больше, чем для первой, и рабочая напряженность, соответственно, также может быть принята в 1,4–1,5 раза больше. Удельная энергия конденсаторов, пропитанных касторовым маслом, может быть увеличена приблизительно в 3 раза.

При работе пленочной и бумажно-пленочной изоляции в режиме многоразрядных импульсов под воздействием частичных разрядов, также как и в пленочной изоляции, наиболее сильно разрушается пропитывающий



состав. Поэтому допустимые рабочие напряженности в основном определяются допустимыми напряженностями в жидком диэлектрике.

В табл. 3.1 приведены допустимые  $E_{p\partial}$ , принимаемые в импульсных конденсаторах (толщина диэлектрика 80 мкм) при различном числе импульсов  $Z$ .

Таблица 3.1

Вид диэлектрика	$E_{p\partial}$ (кВ/мм) при различных сроках службы					
	колебательный разряд $U_{добр}/U_m = 0,8$			аперриодический разряд		
	$Z \leq 10^3$	$Z = 10^4$	$Z = 10^6$	$Z \leq 10^3$	$Z = 10^4$	$Z = 10^6$
Конденсаторная бумага, пропитанная нефтяным маслом	60-70	50-60	40-45	70-80	60-70	50-55
Конденсаторная бумага, пропитанная хлордифенилами или расторовым маслом	90-100	75-80	65-70	100-120	90-100	70-80
Пленочно-бумажная изоляция на основе лавсановой пленки, пропитанная хлордифенилами или расторовым маслом	150-200	100-120	80-100	200-220	160-200	100-120

3.4. Для конденсаторов, работающих с числом импульсов порядка 50 импульсов в секунду (формирующие линии), рабочую напряженность необходимо снижать и принимать примерно такой, как у конденсаторов, работающих непрерывно при частоте 50 Гц, т.е. 10-12 кВ/мм. Зависимость срока жизни конденсатора от рабочей напряженности может быть представлена в следующем виде:

$$\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^n = \frac{\tau_2}{\tau_1}, \quad (3.6)$$

где  $E_1$  - рабочая напряженность при сроке службы  $\tau_1$ ;  $E_2$  - рабочая напряженность при сроке службы  $\tau_2$ ;  $n = 16$  - для постоянного напряжения;  $n = 10$  - для переменного напряжения ( $f = 50$  Гц).

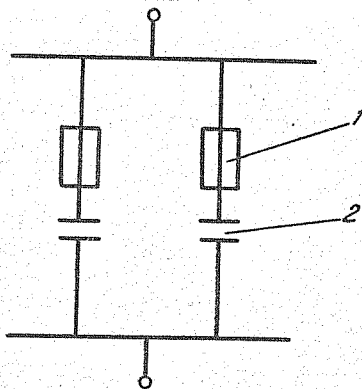
3.5. При разработке конденсаторов для генераторов импульсных

токов с малой повторяемостью импульсов целесообразно допустить повышенную интенсивность частичных разрядов, т.е.  $\epsilon_{\text{раб}}$  может быть выбрана очень высокой (150–180 кВ/мм).

3.6. Для обеспечения минимальной индуктивности контура, в котором работает импульсный конденсатор, необходимо принимать меры для уменьшения его собственной индуктивности (например, применение безындукционной намотки фольги, увеличение числа пар выводов в секции, применение специальных форм обкладок и др.).

3.7. В импульсных конденсаторах большой емкости на рабочее напряжение до 10–12 кВ (при параллельном соединении секций в конденсаторе) в большинстве случаев все секции соединяются с главными шинами через предохранители (рис. 3.3). Это позволяет повысить  $\epsilon_{\text{раб}}$  в конденсаторе, а в случае пробоя секции надежно ее отключить плавкими предохранителями.

Секции с плавкими предохранителями



1 – плавкий предохранитель; 2 – секция конденсатора

Рис. 3.3

3.8. Импульсные конденсаторы испытываются постоянным напряжением, которое составляет  $(1,2+1,5) U_{\text{раб}}$ . По отношению к рабочему напряжению конденсаторов для промышленной частоты или постоянного напряжения испытательное напряжение для импульсных конденсаторов меньше вследствие высоких рабочих напряженностей в конденсаторах данного типа по сравнению с другими конденсаторами.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

НОМЕНКЛАТУРА МАСЛОПАИМЕННЫХ ВВОДОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Условное обозначение ввода	Габариты, мм							Масса, кг (орденгировс но)			Примечание
	H	H <sub>H</sub>	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	Ввода		Масла		
							2	3		4	
I	2	3	4	5	6	7	8	9			Ю
Вводы для силовых трансформаторов											
МБТО 0-45 - 66/400-У1	1415	315	340	300	155	-	77	-	Протяжной, L = 127 см		
МБТО 0-45 - 66/400-У1	1415	315	340	300	155	-	74	-	То же		
МБТОВ 0-45 - 66/630-У1	1470	315	340	300	155	-	90	-	Протяжной, L = 163 см		
БМТ 0-15 - 110/630-У1	2540	970	535	480	230	370	245	35	Протяжной, L = 190 см		
БМТ 0-15 - 110/1000, 1600, 2000-У1	2575	1035	420	380	280	250	200	25	То же		
БМТУ 0-15 - 110/630-У1	2880	970	535	480	230	370	277	40	Протяжной, L = 280 см		

Продолжение табл. П.1

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<u>ВМТУ</u> - 110/1000, 1600, 0-15 2000-У1	2695	1035	420	380	280	400	225	25	∠ = 280 см
<u>ВМТ</u> - 110/630-У1 0-45	2390	663	350	300	180	-	136	20	Протяжной, ∠ = 190 см
<u>ВМТУ</u> - 110/630-У1 0-45	2490	663	350	300	180	-	150	20	Протяжной, ∠ = 280 см
<u>ВМТ</u> - 110/2000-У1 0-90	2540	725	420	380	280	-	248	30	Протяжной, ∠ = 190 см
<u>ВМТУ</u> - 110/2000-У1 0-90	2700	725	420	380	280	-	248	30	Протяжной, ∠ = 280 см
<u>ВМТ</u> - 110/800-У1 0-60	2280	770	290	250	148	280	96	3,5	Протяжной, ∠ = 190 см
<u>ВМТУ</u> - 110/800-У1 0-60	2480	970	290	250	148	350	130	3,5	Протяжной, ∠ = 280 см
<u>ВМТ</u> - 150/630-У1 0-45	2949	848	350	310	180	-	256	30	Протяжной, ∠ = 260 см
<u>ВМТ</u> - 150/2000-У1 0-45	3212	994	420	380	260	-	420	70	То же
<u>ВМТУ</u> - 150/630-У1 0-45	3149	848	350	310	180	-	272	30	Протяжной, ∠ = 390 см

Продолжение табл. П.1

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<u>БМТУ</u> 0-45 - 150/2000-У1	3412	994	420	380	260	-	477	70	То же
<u>БМТ</u> 0-45 - 220/1600-У1	4930	1905	760	720	400	480	910	200	Снят с производства
<u>БМТН</u> 45 - 220/2000	4885	1905	760	720	400	480	930	205	То же
<u>БМТУ</u> 0-45 - 220/1600-У1	5515	1905	760	720	400	540	1173	205	Прямой, L = 570 см
<u>БМТ</u> 0-45 - 220/1600-У1	4940	1205	760	720	400	510	964	190	Прямой, L = 380 см
<u>БМТН</u> 0-45 - 220/1600-У1	4940	1205	760	720	400	510	971	190	То же
<u>БМТУ</u> 0-45 - 220/400-У1	4385	1360	760	720	365	-	1046	140	Прямой, L = 570 см
<u>БМТУ</u> 0-45 - 330/2000-У1	5885	1615	660	560	384	-	1632	170	Прямой, L = 800 см
<u>БМТН</u> 0-30 - 500/1600-У1	7150	2600	1200	1130	590	-	3070	585	Прямой, L = 800 см
<u>БМТН</u> 0-30 - 750/1000-У1	8600	2710	1200	1130	695	-	3750	610	Прямой, L = 1180 см

## Продолжение табл. П.1

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<u>ВМР</u> - 750/320-VI 0-30	8400	2620	1200	1130	695	-	3780	640	Реакторный ввод, про- тяжной, $\angle = 1180$ см
<u>ВМВ</u> - 330/1000-VI 0-45	6415	2160	818	770	410	-	1960	-	Протяжной, $\angle = 800$ см
<u>ВМШ</u> - 500/1000 15	7915	2748	1200	1130	640	750	3390	860	Снят с производства
<u>ВМШ</u> - 500/1600-ХШ 0-30	7150	2600	1200	1130	590	-	3070	585	Протяжной, $\angle = 800$ см
Маслонаполненные вводы для выключателей									
<u>ВМВ</u> - 110/600 15	3054	1130	528	480	280	370	320	60	Снят с производства
<u>ВМВ</u> - 110/1000-VI 0-15	3195	1130	550	486	275	370	316	60	$\angle = 280$ см
<u>ВМВ</u> - 110/2000-VI 0-15	2920	1130	550	486	245	275	238	30	$\angle = 280$ см
<u>ВМВ</u> - 110/2000-VI 0-15	3025	1130	550	486	245	-	266	35	$\angle = 280$ см
<u>ВМВ</u> - 220/1000-VI 15	5240	1820	870	822	470	-	1300	235	Механическое крепление фарфоровой покрышки. Снят с производства

Продолжение табл. П. I

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EMBY -220/2000-VI 0-15	4475	1820	870	818	470	-	1040	185	∠ = 380 см
EMBY -220/1000-VI 0-15	5240	1820	870	818	470	540	1295	185	∠ = 570 см
EMBY -220/2000-VI 0-15	5280	1820	870	818	470	540	1200	120	∠ = 570 см
EMBY -220/2000-XIII 0-15	5280	1820	870	812	580	-	1200	500	∠ = 570 см
EMBY -220/2000-VI 0-15	5500	1820	870	818	470	-	1270	195	∠ = 570 см
EMBY -500/2000 15	8320	3240	1050	1010	680	-	4170	1160	Снят с производства

Маслонасосные ленточные вводы

EM -110/1000 15	3410	1820	528	480	230	-	290	45	Снят с производства
EM -110/2000 15	3665	1900	528	480	230	-	300	45	То же

Окончание табл. П. I

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ММ - 220/1000 15	6350	3335	878	848	570	-	1710	510	Снят с производства
ГВШУ - 110/1000-VI 0-90	3640	1820	420	360	245	-	376	46	$L = 280$ см
ГВШУ - 110/1000-VI 0-90	3610	1805	420	360	245	-	374	45	$L = 280$ см
ГВМ - 220/1000-VI 0-90	5645	3165	890	840	510	-	1497	240	$L = 380$ см

Примечания: I. Под пропаном подразумевается маслонаполненный ввод, у которого отвод от обмотки силового трансформатора протягивается через тоководущую трубу и крепится к головке ввода.

2.  $L$  - длина пути утечки внешней изоляции ввода, см.

3.  $H$  - высота ввода;  $H_1$  - высота нижней части ввода;  $D$  - диаметр фланца соединительной втулки;  $D_1$  - диаметр центров отверстий во фланце соединительной втулки;  $D_2$  - диаметр нижней покрышки;  $D_3$  - диаметр верхней покрышки у соединительной втулки по ребрам.



Таблица П.2

МАШИНЫ КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БОЛЬШИХ ТОКОВ ВНИЗКИ ВНИЗКИ  
 СИЛОВОГО КОНДЕНСАТОРОСТРОЕНИЯ И ЗАВОДА "КОНДЕНСАТОР"

Тип конденсатора	U, кв	C, мкФ	W, Дж	∠κ, мкГн	Кол-во вимп. в мин.	Габариты, мм	Мас-са, кг	Уд. энергия		Гарант. срок служб (число имп.)	Пропитка
								Дж/имп.	А.к. кг		
ИК6-200	6	200	3600	0,6	100	309x138x680	55	133	65	2 · 10 <sup>4</sup>	Трихлодифенил
ИК10-50	10	50	2500	0,1	2	310x138x640	50	92	50	10 <sup>3</sup>	" "
ИК20-6,65	20	6,65	1330	0,5	0,3	570x128x353	49	52	27	10 <sup>4</sup>	" "
ИМ20-8	20	8	1600	0,025	1	314x314x880	145	18,4	11	10 <sup>3</sup>	Конденсаторное масло
ИК 25-12	25	12	3750	0,04	1	314x314x670	110	54	34	3 · 10 <sup>3</sup>	Касторовое масло
ИМ 30-0,2	30	0,2	90	-	20	379x119x325	30	6,2	3	7 · 10 <sup>5</sup>	Конденсаторное масло
ИМ 30-20	30	20	9000	-	1	795x431x1326	750	20	12	10 <sup>4</sup>	" "
ИК 40-5	40	5	4000	0,04	1	314x314x670	110	57	36	3 · 10 <sup>3</sup>	Касторовое масло
ИК 50-1	50	1	1250	0,5	120	314x314x670	150	19	8	3 · 10 <sup>6</sup>	" "
ИМ 50-1,5	50	1,5	1880	0,03	1	314x314x680	110	27	17	10 <sup>3</sup>	Конденсаторное масло
ИК 50-3	50	3	3750	0,04	1	314x314x670	110	54	34	3 · 10 <sup>3</sup>	Конденсаторное масло
ИМ 80-1	80	1	3200	0,4	10-12	723x651x1010	750	5,1	4,4	3 · 10 <sup>4</sup>	" "
ИМ 100-0,1	100	0,1	500	0,2	3	455x150x326	32	22,4	16,6	10 <sup>4</sup>	" "
ИК 100-0,25	100	0,25	1250	0,15	2	455x150x326	32	56	41,6	2 · 10 <sup>3</sup>	Касторовое масло

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бажанов С.А., Воскресенский В.Ф. Монтаж и эксплуатация маслонилененных вводов.- М.: Энергоиздат, 1981.- 104 с.
2. ГОСТ 20690-75. Электрооборудование переменного тока на напряжение 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
3. ГОСТ 1516.1-76. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
4. ГОСТ 1516.2-76. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.
5. Гулевич А.И., Киреев А.П. Производство силовых конденсаторов.- М.: Высшая школа, 1969.- 440 с.
6. Дмитриевский В.С., Торбин Н.М. Расчет и конструирование высоковольтной изоляции.- Томск: Изд-во ТТУ, 1967.- 194 с.
7. Дмитриевский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции.- М.: Энергоиздат, 1981.- 392 с.
8. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы.- Л.: Энергия, 1973.- 176 с.
9. Кучинский Г.С., Назаров Н.И., Назарова Г.Т., Переселенцев И.Ф. Силовые электрические конденсаторы.- М.: Энергия, 1975.- 248 с.
10. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях.- Л.: Энергия, 1979.- 224 с.
11. Кучинский Г.С., Калентьев Ю.Н., Львюк В.А. Расчет проходных изоляторов конденсаторного типа / Учебное пособие.- Л.: изд. ЛПИ, 1983.- 75 с.
12. Куртенок Г.Е. Расчет элементов изоляционных конструкций / Учебное пособие.- Томск; изд. ТПИ, 1983.- 84 с.
13. Куртенок Г.Е. Расчет изоляции высоковольтных конструкций / Учебное пособие.- Томск; изд. ТПИ, 1984.- 95 с.
14. Ренне В.Т. Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком.- М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.- 203 с.
15. Ренне В.Т., Багалеи Ю.В., Фридберг И.Д. Расчет и конструирование конденсаторов.- Киев: Техника, 1966.- 326 с.
16. Ренне В.Т. Электрические конденсаторы.- Л.: Энергия, 1969.- 592 с.
17. Сивявский В.Н. Расчет и конструирование электрокерамических конструкций.- М.: Энергия, 1977.- 192 с.
18. Шахнович М.И. Синтетические жидкости для электрических аппаратов.- М.: Энергия, 1972.- 200 с.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

В В Е Д Е Н И Е .....	3
I. РАСЧЕТ КОНДЕНСАТОРНЫХ ВВОДОВ С БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ	3
I.1. Краткие сведения о конструктивном исполнении вводов	3
I.2. Электрический расчет ввода .....	8
I.2.1. Выбор расчетных напряжений и напряженностей .....	10
I.2.2. Выбор токоведущего стержня .....	12
I.2.3. Расчет внутренней изоляции ввода и геометрических размеров конденсаторных обкладок .....	12
I.2.4. Расчет и конструирование фарфоровой крышки .....	21
I.3. Механический расчет ввода .....	22
I.4. Расчет тепловой устойчивости конденсаторного ввода ..	24
I.5. Конструирование конденсаторного ввода .....	30
2. РАСЧЕТ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ .....	35
2.1. Краткие сведения о назначении и типах силовых конден- саторов .....	35
2.2. Характеристики основных материалов, применяемых в вы- соковольтных конденсаторах (обоснование выбора материалов)...	37
2.3. Выбор рабочей и испытательной напряженностей в ди- электрике конденсатора .....	40
2.4. Расчет секции конденсатора .....	45
2.5. Конструирование пакета секций. Расчет корпусной изо- ляции .....	50
2.6. Выбор проходных изоляторов .....	52
2.7. Тепловой расчет конденсатора .....	55
2.8. Удельные характеристики конденсатора .....	59
3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИЗОЛЯЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ....	61
П Р И Л О Ж Е Н И Я .....	67
Л И Т Е Р А Т У Р А .....	74

## **Расчет вводов высокого напряжения и силовых конденсаторов**

Учебное пособие к курсовому проектированию по дисциплине «Изоляция электротехнического оборудования высокого напряжения» для бакалавров по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», программа «Высоковольтная техника электроэнергетических систем»

Составитель – Геннадий Ефимович Куртенков

Подписано к печати

Формат 60×84/16. Бумага писчая №2.

Печать RISO. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. .

Тираж экз. Заказ . Цена свободная.

Издательство ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина 30.