

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**В.И.МЕРКУЛОВ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЯХ**

**Учебное пособие**

Томск 2001

УДК 621.319.4

Меркулов В.И. Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях. Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2001. - 156с.

В учебном пособии даны понятия электрического поля в различных электроизоляционных конструкциях, рассмотрены методы расчета и способы выравнивания в них напряженности электрического поля, даны основы электрического, теплового и механического расчетов на примере высоковольтного ввода и силового конденсатора, а также методика оценки их срока службы.

Пособие подготовлено на кафедре электроизоляционной, кабельной и конденсаторной техника и предназначено для студентов направления «Электромеханика, электротехника и электротехнологии» специальности 180300.

Рецензенты:

Инженер отдела главного  
энергетика ТНХК, к.т.н.

Николаевский Б.С.

Зав. испытательной лаборатории  
кабельных изделий  
ОАО «НИКИ, г.Томск»

Стрыжков В.А.

Печатается по постановлению Редакционно-издательского Совета Томского политехнического университета

М303010 – 2001

Темплан 2001

© Томский политехнический университет, 2001

## Предисловие

Курс «Математическое моделирование в ЭИК» является базовым курсом при подготовке студентов по специальности «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника». Различные электроизоляционные конструкции – ЭИК (конденсаторы, высоковольтные вводы, кабели, трансформаторы, электрические машины и др.) находят широкое применение в различных отраслях народного хозяйства для передачи, преобразования и использования электроэнергии. От экономичности, надежности и качества этих ЭИК во многом зависит безаварийность и рентабельность производства.

Большинство ЭИК в конструктивном исполнении представляют собой системы, основу которых составляют различные токопроводящие элементы (токоведущая жила, обмотка и др.) и электрическая изоляция. Опыт эксплуатации различных ЭИК показывает, что их экономичность и надежность во многом определяется качеством и надежностью электрической изоляции. Работоспособность электрической изоляции, ее надежность, в свою очередь, зависят от качества самих электроизоляционных материалов, конструктивных особенностей ЭИК и условий их эксплуатации (степени однородности электрического поля, температуры, воздействующих механических нагрузок, грозовых и коммутационных перенапряжений и т.д.).

Основные сведения по расчету и конструированию электрической изоляции тех или иных конструкций освещены в специальной литературе, но не обобщены. Исключением является монография В.С.Дмитревского, которая в настоящее время стала библиографической редкостью, что затрудняет процесс обучения студентов.

Данное пособие призвано восполнить недостаток в учебной литературе и в какой-то мере изложить современные сведения в области математического моделирования в ЭИК. Структура данного курса базируется на основе типовой программы «Расчет и конструирование электрической изоляции, утвержденной учебно-методическим управлением по высшему образованию 02.06.84 г. (индекс УМУ-Т-6/1195).

## Глава 1. Элементы теории вероятностей и математической статистики

### 1.1. Случайные события и их взаимосвязь

Отказ изделия или возникновение какой-либо неисправности при изготовлении, испытаниях или в процессе эксплуатации является нежелательным событием, с которым, однако, необходимо считаться как с объективным явлением.

В большинстве случаев эти события являются случайными, и их появление подчиняется общим законам теории вероятностей.

Появление тех или иных событий является объективным процессом (явлением) и поэтому зависит от объективных причин, т.е. от свойств применяемых материалов, условий испытания (эксперимента) и условий эксплуатации.

1. Событие, которое в результате осуществления определённых условий может либо произойти или не произойти называется *случайным событием*.

2. Событие, которое в определённых условиях не может произойти называется *невозможным*.

3. Событие, которое в данных условиях происходит обязательно, называется *достоверным*.

4. Все достоверные события *равносильны* между собой и обозначаются буквой  $U$ .

5. Все невозможные события также *равносильны* между собой и обозначаются буквой  $V$ .

6. Достоверное и невозможное события - противоположны.

К противоположным событиям относятся события  $A$  и  $\bar{A}$ , где событие  $\bar{A}$  состоит в том, что событие  $A$  не осуществляется. Для противоположных событий  $A$  и  $\bar{A}$  одновременно выполняются два соотношения.

$$A + \bar{A} = U; \quad A \cdot \bar{A} = V.$$

7. Событие, состоящее в наступлении хотя бы одного события  $A$  или  $B$ , называется суммой событий  $A$  и  $B$ , т.е.  $A + B$  (или  $A \cup B$ ).

8. Событие, состоящее в наступлении обоих событий  $A$  и  $B$ , называется произведением событий  $A$  и  $B$ , т.е.  $A \cdot B$  (или  $A \cap B$ ).

9. Событие, состоящее в том, что событие  $A$  происходит, а событие  $B$  не происходит называется разностью событий  $A$  и  $B$ , т.е.  $A - B$ .

10. Различают:

- *несовместимые события*, когда появление одного из событий делает невозможным появление в данном опыте другого (либо орёл, либо - орешка);

- *совместимые события*, когда в данном единичном опыте возможно осуществление одновременно обоих событий;

- *равновозможные события*, когда появление каких-либо событий одинаково возможно;

- *независимые события*, когда появление одного из событий не влияет на появление другого, т.е. вероятность осуществления одного события не зависит от того, совершилось или нет другое событие;

- *зависимое событие*, когда появление одного из событий зависит от осуществления другого события.

11. Если при испытаниях или других условиях, при которых происходит событие  $A$ , происходит и событие  $B$ , т.е. можно говорить, что событие  $A$  влечёт за собой  $B$  (или  $A$  является частным случаем  $B$ )

$$A \subset B \quad \text{или} \quad B \supset A.$$

12. Если событие  $A$  влечёт за собой  $B$  и в то же время  $B$  влечёт за собой  $A$ , т.е. в данных условиях события  $A$  и  $B$  оба наступают или не наступают, то можно говорить что события  $A$  и  $B$  равносильны (тождественны), т.е.  $A = B$ .

13. Если  $A = B_1 + B_2 + \dots + B_n$  и события  $B_i$  попарно несовместимы, то говорят, что событие  $A$  подразделяется на частные случаи  $B_1, B_2 \dots B_n$ .

14. События  $B_1 B_2 B_3 \dots B_n$  образуют полную группу событий если хотя бы одно из них непременно должно произойти, т.е.

$$B_1 + B_2 + \dots + B_n = U.$$

15. Если событие  $A$  подразделяется на  $m_A$  частных случаев, входящих в полную группу из  $n$  попарно несовместимых и равновозможных событий, то отношение  $m_A/n$  называют относительной частотой  $h_A$  или вероятностью этого события:

$$P(A) = m_A / n ;$$

$$\text{при } n \rightarrow \infty \quad P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} h(A),$$

где  $m_A$  - число появлений событий;

$n$  - общее число всех равновозможных событий.

Предельная величина  $h(A)$ , т.е.  $P(A)$  называется *статистической вероятностью*. Можно сказать, что статистическая вероятность  $P(A)$  является количественной мерой степени возможности появления случайного события.

*Данная функция обладает следующими свойствами:*

- Для каждого случайного события  $P(A) > 0$  или  $0 = P(V) < P(A) < P(U) = 1$ ;
- Для достоверного события  $P(U) = 1$ ;

- Для невозможного события  $P(V) = 0$ .  
Так как достоверное и невозможное события несовместимы, то  $P(U) + P(V) = P(U)$ .
- Вероятность события  $\bar{A}$ , противоположного событию  $A$ , равна  $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$ , т.к.  $A + \bar{A} = U$ , то  $P(A + \bar{A}) = 1$  или  $P(A + \bar{A}) = P(A) + P(\bar{A}) = 1$ .
- Если событие  $A$  подразделяется на частные случаи  $B$  и  $C$ , и все три события принадлежат полю  $\mathcal{S}$ , то
 
$$P(A) = P(B) + P(C). \quad (1.1)$$
 Это свойство называется теоремой сложения вероятностей.
- Если событие  $A$  влечёт за собой событие  $B$ , то событие  $B$  может быть представлено как сумма двух событий  $A$  и  $\bar{A}B$ , т.е.  $P(A) < P(B)$  или  $P(B) = P(A + \bar{A} \cdot B) = P(A) + P(\bar{A} \cdot B) \geq P(A)$ .
- Если случайное событие  $C$  является суммой конечного числа несовместимых событий  $A_1 A_2 \dots A_n$ , имеющих вероятность, то вероятность  $P(C)$  равна  $P(C) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n)$ , это можно записать по-другому:  $P(C) = P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n)$ .
- Пусть  $A$  и  $B$  произвольные события, при этом  $A + B = A + (B - AB)$ . Поскольку в суммах слагаемые являются несовместимыми событиями, то  $P(A + B) = P(A) + P(B - AB)$  или  $P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB)$ .  
В силу неотрицательности  $P(AB)$  следует  $P(A + B) < [P(A) + P(B)]$ .  
В общем случае суммой событий  $A_1 A_2 \dots A_n$  называется сложное событие, состоящее в том, что происходит (осуществляется) хотя бы одно из событий, либо событие  $A_1 \dots$ , либо событие  $A_n$ .

Вероятность суммы событий равна

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n P(A_i A_j) + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n P(A_i A_j A_k) - \dots + (-1)^{n-1} P\left(\prod_{i=1}^n A_i\right).$$

- Вероятность осуществления события  $A$  при условии, что произошло событие  $B$  обозначается  $P(A/B)$  и называется *условной вероятностью*.

Если события  $A$  и  $B$  независимые, то

$$P(A/B) = P(A) \quad \text{или} \quad P(B/A) = P(B).$$

Можно записать также

$$P(A/B) = \frac{P(A \cdot B)}{P(B)} \quad \text{или} \quad P(B/A) = \frac{P(A \cdot B)}{P(A)}.$$

Условная вероятность обладает всеми свойствами вероятности, так если  $A=B$ , то

$$P(B/A) = P(B/B) = \frac{P(B \cdot B)}{P(B)} = \frac{P(B)}{P(B)} = 1.$$

Из этого следует:

$$P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B/A) \quad \text{или}$$

$$P(A \cdot B) = P(B) \cdot P(A/B), \quad \text{т.е.} \quad (1.2)$$

вероятность произведения двух событий равна произведению вероятности одного из этих событий на условную вероятность другого при условии, что первое событие уже произошло. Это *теорема умножения* вероятностей.

Для независимых событий

$$P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B).$$

В общем виде для независимых событий  $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{in}$

$$P(B_{i1} \cdot B_{i2} \cdot \dots \cdot B_{in}) = P(B_{i1}) \cdot P(B_{i2}) \cdot \dots \cdot P(B_{in}).$$

10. Предположим теперь, что событие  $B$  может осуществляться с одним и только одним из  $n$  несовместимых событий  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{in}$ , иными словами положим:

$$B = \sum_{i=1}^n B \cdot A_i,$$

где события  $B \cdot A_i$  и  $B \cdot A_j$  с разными индексами несовместимы.

Из теоремы сложения вероятностей следует

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(BA_i).$$

Используя теорему умножения вероятностей, находим:

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(B/A_i). \quad (1.3)$$

Полученное выражение называется *формулой полной вероятности*.

## 1.2. Числовые характеристики случайных величин

### 1.2.1. Математическое ожидание

При решении многих вероятностных задач часто требуется найти среднее значение случайной величины. Для этого вводится постоянная, называемая математическим ожиданием.

а) Пусть для некоторой случайной величины  $\xi$  имеются дискретные значения  $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$  и соответствующие им вероятности  $p_1, p_2, \dots, p_n, \dots$

В этом случае математическим ожиданием называется сумма произведений всех ее возможных значений ( $x_i$ ) на их вероятности ( $p_i$ ):

$$M_{\xi} = \sum_{i=1}^k x_i \cdot p_i. \quad (1.4)$$

Если множество возможных значений случайной величины  $x$  бесконечно, то

$$M_{\xi} = \sum_{i=1}^{\infty} x_i \cdot p_i. \quad (1.5)$$

б) В случае непрерывности случайной величины с функцией распределения  $f(x)$  и при условии, если ряд  $\sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i$  абсолютно сходится, то математическое ожидание выражается интегралом:

$$M_{\xi} = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) \cdot dx = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot p(x) \cdot dx. \quad (1.6)$$

Здесь  $p(x)$  – плотность распределения вероятностей.

В случае нормального закона распределения случайной величины  $\xi$

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}};$$

$$M_{\xi} = \int_0^{\infty} x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx;$$

Делая замену  $z = \frac{x-a}{\sigma}$  и интегрируя, получаем:

$$M_{\xi} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int (\sigma z + a) e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \underbrace{\int z e^{-\frac{z^2}{2}} dz}_0 + \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \underbrace{\int e^{-\frac{z^2}{2}} dz}_{\sqrt{2\pi}} = a.$$

Отсюда  $M_{\xi} = a$ , т.е. параметр  $a$  для нормального закона распределения равен математическому ожиданию, как среднему арифметическому.



### 1.2.2. Дисперсия

Дисперсией случайной величины  $\xi$  называется математическое ожидание квадрата отклонения  $\xi$  от  $M_\xi$  и обозначается  $D_\xi$

$$D_\xi = M(\xi - M_\xi)^2 = \int_0^\infty x \cdot df_\eta(x). \quad (1.6)$$

Здесь через  $f_\eta(x)$  обозначена функция распределения случайной величины  $\eta = (\xi - M_\xi)^2$ .

Для практических расчетов используют формулу

$$D_\xi = \int (x - M_\xi)^2 \cdot df_\xi(x) = M\xi^2 - (M_\xi)^2. \quad (1.7)$$

Здесь через  $f_\xi(x)$  обозначена функция распределения случайной величины  $\xi$

Для нормального закона распределения, где  $M_\xi = a$  можно записать:

$$D_\xi = \int (x - a)^2 \cdot P(x) \cdot dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int (x - a)^2 \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \cdot dx. \quad (1.8)$$

Заменяя  $z = \frac{x - a}{\sigma}$  и интегрируя по частям, получим:

$$D_\xi = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int z^2 \cdot \sigma^2 \cdot e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dz = \sigma^2, \quad (1.9)$$

т.е. дисперсия определяется параметром распределения  $\sigma^2$  (квадратичным отклонением) и характеризует рассеяние случайной величины  $\xi$  относительно  $a = \bar{x}$  (чем меньше дисперсия, тем меньше рассеяние).

### 1.2.3. Теоремы о математических ожиданиях и дисперсии

Соотношения между математическими ожиданиями устанавливаются при помощи следующих теорем:

1. Математическое ожидание случайной величины  $(a+bx)$ , где  $a$  и  $b$  постоянные, равно:

$$M(a+bx) = \int_{-\infty}^{\infty} (a+bx) \cdot df(x) = a + b \cdot M(x), \quad (1.10)$$

т.е. математическое ожидание постоянной равно самой постоянной  $[M(a) = a]$ ; постоянный множитель можно выносить за знак математического ожидания  $[M(bx) = bM(x)]$ .

2. Математическое ожидание суммы случайных величин равно сумме математических ожиданий этих величин:

$$M\left(\sum_{h=1}^n X_h\right) = \sum_{h=1}^n M(X_h) \quad \text{или} \quad (1.11)$$

$$M(X_1 + X_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (X_1 + X_2) \cdot df(X_1, X_2) = M(X_1) + M(X_2) \quad (1.12)$$

$$M(X_1 - X_2) = M(X_1) - M(X_2). \quad (1.13)$$

3. Математическое ожидание произведения независимых случайных величин равно произведению их математических ожиданий:

$$M\left(\prod_{h=1}^n X_h\right) = \prod_{h=1}^n M(X_h) \quad \text{или} \quad (1.14)$$

$$M(X_1 \cdot X_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} X_1 \cdot X_2 \cdot ddf(X_1, X_2) = M(X_1) \cdot M(X_2). \quad (1.15)$$

Следствие: Постоянный множитель можно выносить за знак математического ожидания.

4. Дисперсия постоянного равна нулю

$$DC = M(C - MC)^2 = M(C - C)^2 = M0 = 0. \quad (1.16)$$

5. Если  $C$  - постоянная, то

$$D(C\xi) = C^2 \cdot D_\xi, \quad \text{так как} \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} D(C\xi) &= M[C\xi - MC\xi]^2 = M[C\xi - CM_\xi]^2 = MC^2[\xi - M_\xi]^2 = \\ &= C^2 M[\xi - M_\xi]^2 = C^2 D_\xi. \end{aligned}$$

6. Дисперсия суммы независимых случайных величин  $\xi$  и  $\eta$  равна сумме их дисперсий

$$D(\xi + \eta) = D_\xi + D_\eta + \underbrace{2M(\xi - M_\xi)(\eta - M_\eta)}_{=0} = D_\xi + D_\eta. \quad (1.18)$$

#### 1.2.4. Понятие о моментах

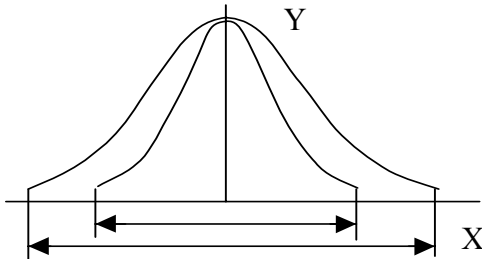
Моментом  $K$ -го порядка случайной величины  $\xi$  называется математическое ожидание величины  $(\xi - a)^K$

$$\mu_k = M(\xi - a)^k = \int (x - a)^k dF(x). \quad (1.19)$$

Если  $a = 0$ , то момент называется *начальным*, если  $a = M_\xi$ , то момент называется *центральным*.

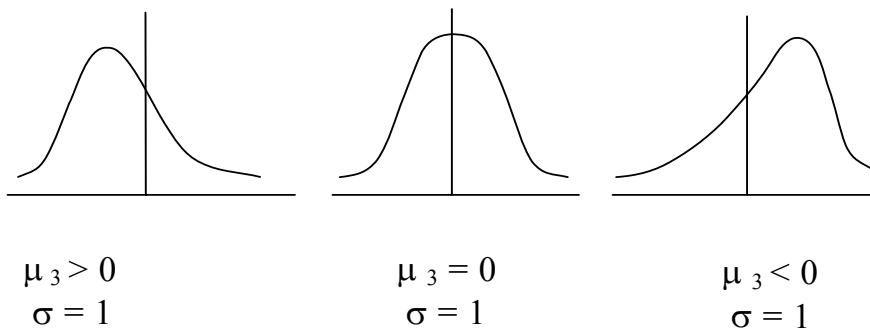
Величина  $\mu_k = M/\xi - a/k$  называется *абсолютным моментом K-го* порядка.

- При  $K = 1, a = 0$  центральный момент соответствует математическому ожиданию как среднему значению функции распределения  $f(x)$ .

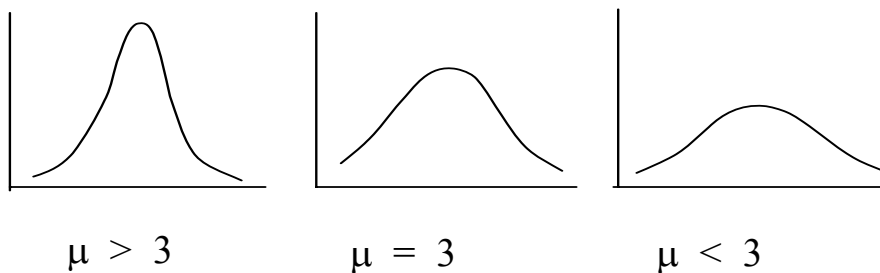


- При  $K = 2, a = M$  центральный момент второго порядка ( $\mu_2$ ) соответствует дисперсии и задает значение  $\sigma^2$ , как меру ширины функции распределения.

- При  $K = 3, a = M$  центральный момент третьего порядка ( $\mu_3$ ) используется для вычисления отношения  $\gamma = \mu_3 / \sigma^3$ , которое служит мерой асимметрии функции распределения относительно математического ожидания. При  $\mu_3 = 0$  функция распределения симметричная.



- При  $K = 4, a = M$  центральный момент четвертого порядка ( $\mu_4$ ) используется для вычисления эксцесса  $\delta = (\mu_4) / (\sigma^4 - 3)$ , который характеризует заостренность (плоскость) кривой распределения.



Если  $\sigma = 1$  и  $\mu > 3$ , то график функции плотности имеет эксцесс, превышающий нормальный (кривая заострена); если  $\mu = 3$ , то нормальный эксцесс (средняя заостренность); если  $\mu < 3$ , то кривая плоская (заниженный эксцесс).

### **1.3. Основные понятия и показатели надежности**

Проблема качества, надёжности изделий является одной из важнейших задач современности. Согласно ГОСТ 13377-75, **надёжность** - это свойство технического изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в установленных пределах в течение требуемого промежутка времени.

Основными показателями **надёжности** является пара противоположных понятий - **работоспособность и отказ**.

**Работоспособность**- это состояние объекта, при котором он может выполнять заданные функции при установленных значениях параметров функционирования.

**Отказ** – это событие, которое заключается в нарушении работоспособности изделия вследствие возникновения неисправности.

**Надёжность** обеспечивается:

1. **Безотказностью**, т.е. способностью объекта сохранять работоспособность в течение заданного промежутка времени (наработки) без вынужденных перерывов.

2. **Сохраняемостью** - способностью объекта сохранять эксплуатационные показатели на заданном уровне в течение заданного срока хранения, транспортирования.

3. **Долговечностью** - способностью объекта сохранять работоспособность до предельного состояния (не устранимого отказа) с необходимыми перерывами для технического обслуживания.

4. **Ремонтпригодностью** - способностью объекта быть пригодным для ремонта и технического обслуживания.

#### **1.3.1. Количественные показатели надежности**

Для количественной оценки показателей надежности могут использоваться различные характеристики, представленные в табл. 1

Таблица 1

Свойство	Обозначение показателя	Понятие показателя
<b>1.Безотказность (надежность)</b>	$P(\tau)$ $\tau_{\text{ср}}$ $\lambda(\tau)$ $a(\tau)$ $\omega(\tau)$	* Вероятность безотказной работы (в заданном интервале времени) * Нарботка на отказ или среднее время безотказной работы (это среднее значение наработки ремонтируемых изделий между отказами) * Интенсивность отказов (определяется вероятностью отказа неремонтируемых изделий в ед. времени) * Плотность вероятности отказов * Поток отказов (среднее количество отказов ремонтируемых изделий в единицу времени)
<b>Долговечность</b>	$\tau_p$ $\tau_{p.ч.}; \tau_{p.ср.}; \tau_{p.m.}$ $\tau_{p.\gamma}$ $\tau_{ср.сл}$	* Ресурс - наработка изделия до предельного состояния (в ч.) * Различают: частный ресурс, средний ресурс, медианный, межремонтный ресурс * $\gamma$ -% ресурс, то есть ресурс, который имеет в среднем не менее $\gamma$ % объектов данного типа * Срок службы, который в отличие от ресурса, определяется календарной продолжительностью работы до отказа
<b>Ремонтопригодность</b>	$\tau_{\text{восст.}}$	* Среднее время восстановления, то есть время, необходимое для ремонта (время простоя)
<b>Сохраняемость</b>	$\tau_{\text{хран}}$	* Срок сохраняемости. Различают: медианный и $\gamma$ -% срок службы

### 1. Вероятность безотказной работы $P(\tau)$

Между вероятностью безотказной работы  $P(\tau)$  и вероятностью отказа  $Q(\tau)$  существует прямая связь, которая может быть выражена соотношением:

$$P(\tau) = 1 - Q(\tau) \quad , \quad (1.20)$$

где значения  $P(\tau)$  и  $Q(\tau)$  лежат в интервале от 0 до 1.

При  $\tau=0$   $P(\tau)=1$ , а  $Q(\tau)=0$ ; при  $\tau=\infty$   $P(\tau)=0$ , а  $Q(\tau)=1$ . Это можно изобразить графиком (рис1.1).

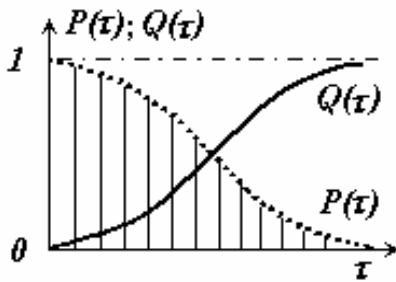


Рис.1.1

Из Рис.1.1. следует, что  $P(\tau)$  является убывающей функцией, а  $Q(\tau)$  возрастающей.

2. **Частота отказов  $a(\tau)$**  - это число отказов в единицу времени, отнесенное к первоначальному числу образцов изделия, то есть

$$\bar{a}(\tau) = \frac{\Delta n(\tau)}{n \cdot \Delta \tau}, \quad (1.21)$$

где  $\Delta n(\tau)$  - число отказавших образцов изделия в интервале времени  $\Delta \tau$ ,  
 $n$  - число образцов изделия.

Частота отказов  $a(\tau)$  выражает собой плотность вероятности отказов  $f(\tau)$ .

$$a(\tau) = f(\tau) = \frac{dQ(\tau)}{d\tau} = -\frac{dP(\tau)}{d\tau}, \quad (1.22)$$

отсюда можно записать

$$Q(\tau) = \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau \quad \text{или} \quad (1.23)$$

$$P(\tau) = 1 - \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau. \quad (1.24)$$

3. **Интенсивность отказов  $\lambda(\tau)$**  - это отношение плотности вероятности отказов  $f(\tau)$  к вероятности отказов  $P(\tau)$ , то есть

$$\lambda(\tau) = \frac{f(\tau)}{P(\tau)} = \frac{a(\tau)}{P(\tau)} \quad [1/c]. \quad (1.25)$$

После интегрирования получим:

$$\int_0^{\tau} \lambda(\tau) \cdot d\tau = -\ln P(\tau), \quad \text{откуда} \quad P(\tau) = e^{-\int_0^{\tau} \lambda(\tau) \cdot d\tau}. \quad (1.26)$$

Исходя из уравнений 1.22;1.25;1.26, получаем:

$$a(\tau) = f(\tau) = \lambda(\tau) \cdot P(\tau) = \lambda(\tau) \cdot e^{-\int_0^{\tau} \lambda(\tau) d\tau} \quad (1.27)$$

При экспоненциальном законе распределения отказов получим

$$\left| \begin{array}{l} P(\tau) = e^{-\lambda\tau}, \\ Q(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}, \\ a(\tau) = \lambda \cdot e^{-\lambda\tau}. \end{array} \right. \quad (1.28)$$

Если функция  $f(\tau)$  неизвестна, то

$$P(\tau) \approx \frac{N(\tau)}{n}, \quad (1.29)$$

где  $N(\tau)$  - число изделий, оставшихся работоспособными до конца наработки  $\tau$ ;  
 $n$  - число изделий.

4. **Поток отказов  $\omega(\tau)$**  можно выразить через математическое ожидание числа отказов до наработки  $H(\tau)$ , т.е.

$$\omega(\tau) = \frac{dH(\tau)}{d\tau}, \quad \text{где} \quad (1.30)$$

$$H(\tau) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n m_i(\tau)}{n}. \quad (1.31)$$

Здесь  $m_i$  – число отказов  $i$ -го изделия.

4. **Среднее время безотказной работы** или наработка на отказ

$$\tau_{cp} = \int_0^{\infty} P(\tau) d(\tau), \quad \text{т.е.} \quad (1.32)$$

графически величина  $\tau_{cp}$  определяется площадью под кривой надежности  $P(\tau)$  или под кривой зависимости  $F(\tau) = f(\tau)$ .

### Показатели долговечности

6. Для оценки долговечности чаще всего используют понятия среднего ресурса, медианного ресурса

$$T_{p,cp} = \int \tau \cdot f_p(\tau) \cdot d(\tau); \quad (1.33)$$

$$T_{p,cp} \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{pi}. \quad (1.34)$$

$$T_{p,медиан} \text{ находят из условия : } \int_0^{T_{p,m}} f_p(\tau) \cdot d(\tau) = 0.5 \quad (1.35)$$

7.  **$\gamma$ - % ресурс** находят из условия:

$$P(T_{p,\gamma}) = \int_{T_{p,\gamma}}^{\infty} f_p \cdot (\tau) \cdot d(\tau) = \gamma / 100 . \quad (1.36)$$

8. Средний срок службы

$$T_{ср.сл} = \int_0^{\infty} \tau \cdot f_{сл}(\tau) d(\tau) \quad \text{или} \quad T_{ср.сл} \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{сл_i} . \quad (1.37)$$

9. Среднее время восстановления

$$T_{вос} = \int_0^{\infty} \tau \cdot f_{вос}(\tau) d(\tau) \quad \text{или} \quad T_{вос} \cong \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{вос_i} . \quad (1.38)$$

Здесь  $T_{вос}$  – время, затраченное на восстановление  $i$ -го изделия;  
 $n$  – число обслуживаний.

10. Срок сохраняемости

$$T_{сохр} = \int_0^{\infty} \tau \cdot f_{сохр}(\tau) d(\tau) \quad \text{или} \quad T_{сохр} \cong \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{сохр_i} . \quad (1.39)$$

Здесь  $T_{сохр}$  – время сохраняемости  $i$ -го изделия.

11. Если при эксплуатации периоды работы и периоды восстановления после отказов для ремонтируемых изделий чередуются, то коэффициент готовности будет равен:

$$K_2 = \frac{T}{T + T_{вос}} < 1 . \quad (1.40)$$

Здесь вместо наработки  $T$  может стоять межремонтный ресурс  $T_{межрем.рес}$ .

12. Коэффициент технического использования находится:

$$K_{т.и.} = \frac{T_{сум}}{T_{сум} + T_{рем} + T_{обсл}} , \quad (1.41)$$

где  $T_{сум}$  – суммарное время наработки;  
 $T_{рем}$   $T_{обсл}$  – простои на ремонт и техническое обслуживание.

### 1.3.2. Классификация отказов

Согласно ГОСТ 13377-75 **Отказ** – это событие, которое заключается в нарушении работоспособности изделия вследствие возникновения неисправности. Признаки и виды отказа представлены в табл. 2.



Таблица 2

<i>Признак отказа</i>	<i>Вид отказа</i>
Изменение основного параметра ( $E_{пр}$ , $tg\delta$ ) до момента отказа	Внезапный; Постепенный
Возможность дальнейшей эксплуатации после отказа	Полный; Частичный
Связь между отказами отдельных элементов	Независимый; Зависимый
Наличие внешних проявлений	Очевидный; Скрытый
Характер устранения отказов (устойчивость неработоспособности)	Устойчивый; Самоустраняющийся сбой, перемежающийся
Причина возникновения: а) ошибки при конструировании; б) дефекты при изготовлении (нарушение технологии); в) перегрузки при эксплуатации	Конструкционный; Технологический (производственный); Эксплуатационный
Природа происхождения отказа	Естественный; Искусственный
Время возникновения отказов	при испытании; приработочный; в условиях нормальной эксплуатации; в последний период нормальной эксплуатации

Характер распределения отказов во времени может быть показан зависимостью  $\lambda(\tau)=f(\tau)$ , как показано на рис.1.2.

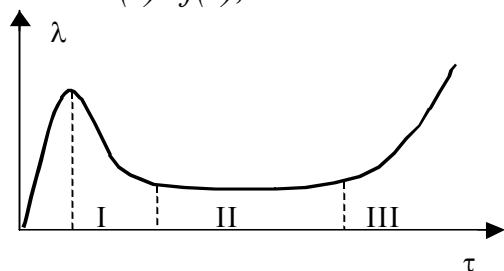


Рис. 1.2. Характер изменения интенсивности отказов во времени

На данном рисунке можно выделить три периода:

**I период** - период приработки, где  $\lambda$  сначала возрастает, а затем уменьшается. В этом периоде происходит выявление скрытых дефектов в изделиях, которые не были обнаружены при испытаниях и контроле.

**II период** – период нормальной эксплуатации, где  $\lambda$  практически остается постоянной. Отказы на данном участке иногда называют критическими

(внезапными), т.к. связаны с возникновением критической концентрации нагрузок, превышающих запас прочности изделия.

**III период** – период износных отказов, где  $\lambda$  резко возрастает со временем  $\tau$ .

#### 1.4. Законы распределения отказов

Причины возникновения тех или иных отказов отражают определенные физические процессы, обусловленные характером скрытых дефектов на 1 периоде, естественными процессами старения под действием приложенной нагрузки на 2 периоде и усталостным разрушением на 3 периоде.

Здесь можно было бы попытаться классифицировать отказы по физическим и физико-химическим процессам разрушения определенной группы изделий ЭИС. Однако природа этих процессов очень сложна и многообразна. Поэтому при решении этого вопроса чаще прибегают к математическим моделям. Наибольший интерес представляет рассмотрение закономерностей отказов в период нормальной эксплуатации.

В качестве математической модели распределения вероятностей критических (внезапных) отказов могут быть использованы различные законы распределения:

1. Нормальный закон распределения
2. Экспоненциальный
3. Вейбулловский
4.  $\gamma$ -распределение
5. Распределение Пуассона
6. Биноминальное распределение.

Рассмотрим основные (чаще используемые) законы распределения и их свойства.

##### 1. Экспоненциальное распределение

При экспоненциальном законе распределения имеем:

$$P(\tau) = e^{-\lambda\tau}, \quad Q(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}, \quad a(\tau) = \lambda \cdot e^{-\lambda\tau}. \quad (1.42)$$

Графически эти зависимости представлены на рис. 1.3.

Для экспоненциального закона распределения характерно постоянство интенсивности внезапных отказов  $\lambda$ .

В этом случае среднее время между соседними отказами или наработка на отказ  $\tau_{cp}$  равно средней наработке до первого отказа  $T_{cp}$ .

Тогда при  $\tau_{cp} = T_{cp}$  можно записать:

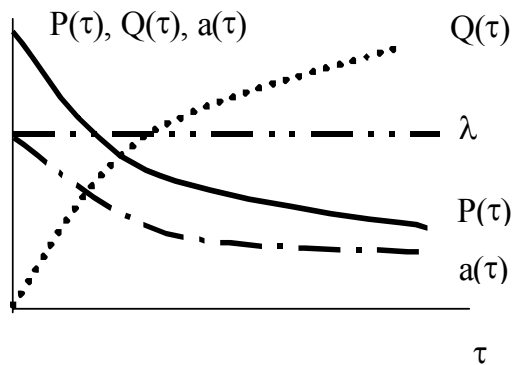


Рис. 1.3. Зависимости  $P(\tau)$ ,  $Q(\tau)$ ,  $\lambda$  и  $a(\tau)$  от  $\tau$  для экспоненциального закона распределения

$$P(\tau) = e^{-\lambda T_{cp}} = 1/e \approx 0.37, \quad (1.43)$$

т.е. при экспоненциальном убывании во времени надежности среднее время безотказной работы или ср. наработка до первого отказа  $T_{cp}$ , есть время, в течение которого вероятность  $P(\tau)$  уменьшается до 0,37.

## 2. Нормальное распределение

Нормальный закон распределения представляет собой распределение случайных величин, группирующихся около среднего значения с определенными частотами. Такое распределение может иметь место, когда на исследуемую величину воздействуют ряд случайных факторов, каждый из которых оказывает незначительное влияние на суммарное значение отклонения величины от ее среднего значения.

Для данного закона распределения можно записать:

$$f(\tau) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma^2}}, \text{ при } \tau = \bar{\tau} \quad f(\tau) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}};$$

$$P(\tau) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma^2}} d\tau. \quad (1.44)$$

Кривая нормального распределения, известная как кривая Гаусса – Лапласа, показана на рис.1.4. Здесь  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение случайной величины,  $\bar{\tau}$  - среднее значение независимой переменной  $\tau$ .

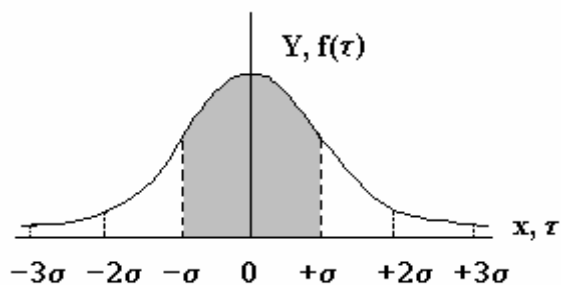


Рис. 1.4. Кривая нормального распределения вероятностей

Площадь под кривой, заключенная в промежутке  $\pm \sigma$ , выражается интегралом Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-x}^{+x} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad \text{или в силу симметрии} \quad (1.45)$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad \text{- это табличное значение.} \quad (1.46)$$

В данном случае  $x = \tau$  ;  $\bar{x} = \bar{\tau}$ .

Выражая рассматриваемые функции через интеграл Лапласа, можем записать:

$$a(\tau) = f(\tau) = \frac{\sqrt{2/\pi}}{\sigma[1 + \Phi(\frac{\tau - \bar{\tau}_p}{\sigma\sqrt{2}})]} e^{-\frac{(\tau - \bar{\tau}_p)^2}{2\sigma^2}} ; \quad (1.47)$$

$$P(\tau) = \frac{1 - \Phi(\frac{\tau - \bar{\tau}_p}{\sigma\sqrt{2}})}{1 + \Phi(\frac{\tau - \bar{\tau}_p}{\sigma\sqrt{2}})}, \quad (1.48)$$

$$\lambda(\tau) = \frac{\sqrt{2/\pi} e^{-\frac{(\tau - \bar{\tau}_p)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma[1 - \Phi(\frac{\tau - \bar{\tau}_p}{\sigma\sqrt{2}})]}, \quad \text{здесь} \quad (1.49)$$

$\Phi(\frac{\tau - \bar{\tau}_p}{\sigma\sqrt{2}})$  - интеграл Лапласа, определяемый для значения

$x = \frac{\tau - \bar{\tau}}{\sigma\sqrt{2}}$  из таблицы.

Согласно приведенным уравнениям, можно показать характер их изменения во времени.

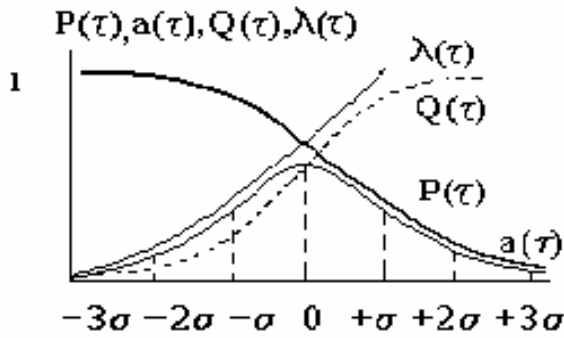


Рис. 1.5. Зависимости  $P(\tau)$ ,  $Q(\tau)$ ,  $\lambda$  и  $a(\tau)$  от  $\tau$  для нормального закона распределения

### 3. Распределение Вейбулла

При этом распределении частота отказов или плотность вероятности определяется уравнением:

$$a(\tau) = f(\tau) = \lambda_0 k \tau^{k-1} e^{-\lambda_0 \tau^k}, \quad (1.50)$$

где  $\lambda_0$  - параметр, определяющий масштаб;  
 $k$  - параметр асимметрии распределения.

В этом случае:

$$\left| \begin{aligned} P(\tau) &= e^{-\lambda_0 \tau^k} \\ \lambda(\tau) &= \lambda_0 k \tau^{k-1} \\ T_{cp} &= \frac{\Gamma(1/k + 1)}{\lambda_0^{1/k}} \end{aligned} \right. \quad (1.51)$$

Здесь  $\Gamma(1/k + 1)$  -  $\gamma$  функция, определяемая по значению  $(1/k + 1)$ .

Согласно данным уравнениям, характер изменения параметров  $P(\tau)$ ,  $a(\tau)$  и  $\lambda(\tau)$  зависит от величины параметра  $k$ , что видно из приведенных рисунков (1.6).

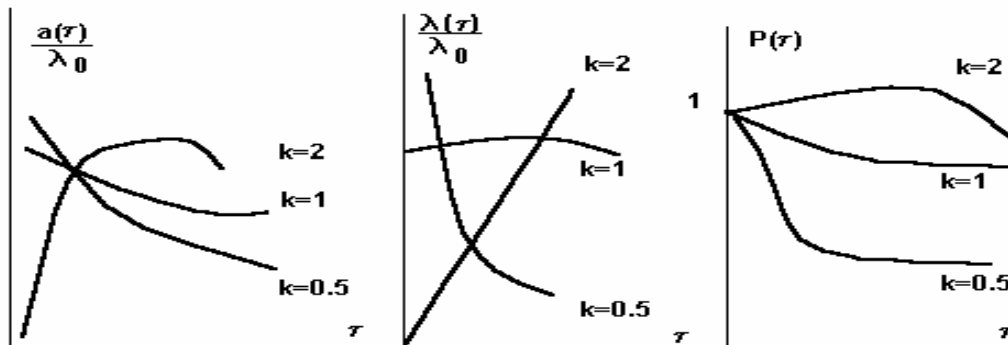


Рис.1.6

При  $k=1$  распределение Вейбулла превращается в обычное экспоненциальное распределение. При  $k>1$  интенсивность отказов возрастает с 0, а при  $k<1$  начинается с  $+\infty$  и со временем стремится к 0.

Распределение Вейбулла широко используется при анализе распределения значений  $E_{np}$  и срока службы  $\tau_{cl}$  ЭИК. Для этого распределения часто наблюдается композиция распределений, как показано на рис.1.7(б).

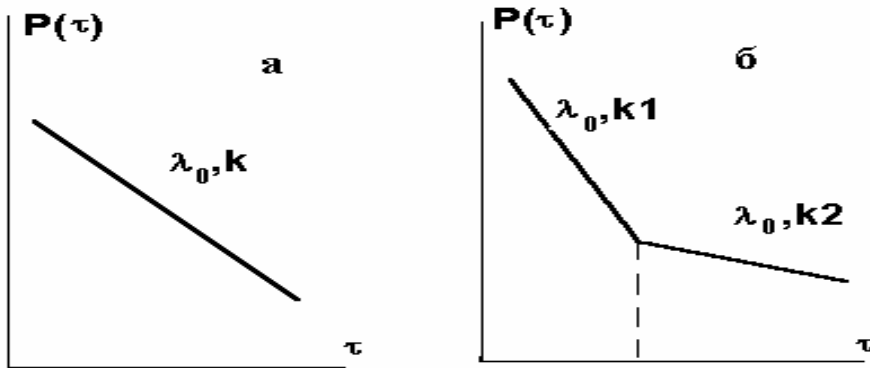


Рис. 1.7. Распределение Вейбулла

#### 4. $\gamma$ -распределение.

В этом случае частота отказов  $a(\tau)$  или плотность их вероятности описывается уравнением :

$$a(\tau) = f(\tau) = \lambda_0 \frac{(\lambda_0 \tau)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_0 \tau}, \quad (1.52)$$

где  $\lambda_0$  - параметр  $\gamma$ -распределения.

При целом и положительном значении  $k$  можно найти

$$\left\{ \begin{aligned} P(\tau) &= e^{-\lambda_0 \tau} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 \tau)^i}{i!} \\ \lambda(\tau) &= \frac{\lambda_0 (\lambda_0 \tau)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 \tau)^i}{i!}} \\ T_{cp} &= k / \lambda_0 \end{aligned} \right. \quad (1.53)$$

Здесь параметр  $k$  характеризует асимметрию и выход величин за  $\gamma$ -распределение.

Согласно приведенным выражениям, можно показать характер изменения этих показателей от времени при различных значениях  $k$  (см. рис. 1.8).

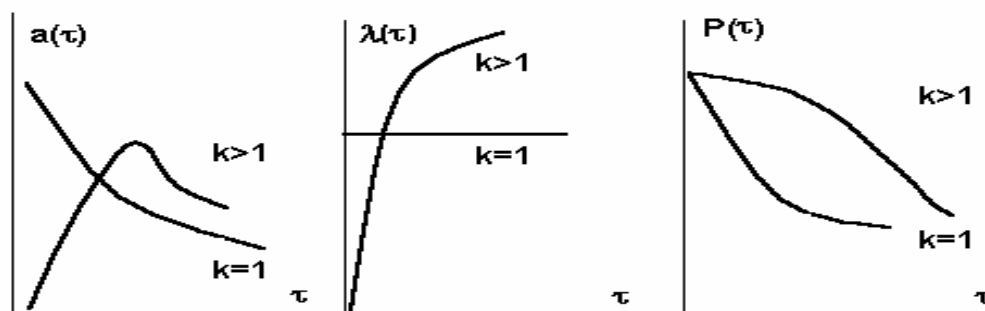


Рис. 1.8

Из рис.1.8. видно, что при  $k = 1$ , как и в случае распределения Вейбулла  $\gamma$ -распределение становится чисто экспоненциальным.

Кроме рассмотренных выше законов распределения при оценке надежности могут также использоваться распределение Рэлея, биномиальное распределение, распределение Пуассона и др.

### 1.5. Статистическая обработка данных

Наиболее часто при обработке данных наблюдений производится оценка среднего значения  $\bar{X}$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma$ . Для их определения берется выборка из  $n$ –независимых испытаний (или производят  $n$  испытаний). Полученные значения, то есть совокупность значений  $X_i$  образуют первичный статистический материал. Если никакая группировка полученных значений не производится, то искомые величины находятся:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}, \quad (1.54)$$

где  $n$  –число значений  $X_i$ , то есть число независимых испытаний.

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}, \quad (1.55)$$

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (1.56)$$

При большом числе значений  $X_i$  (более 30) опытные данные группируются по интервалам и разрядам. Полученный статистический ряд оформляется в виде таблицы:

<b>N</b> <b>интервала</b> <b>i</b>	<b>Ширина</b> <b>интервала</b> $X_{i-1}, X_i$	<b>Середина</b> <b>интервала</b> $X^* = \frac{X_{i-1} + X_i}{2}$	<b>Число</b> <b>попаданий</b> <b>в интервал</b> $m_i$	<b>Частость</b> $P_i = \frac{m_i}{n}$
1	$X_{min} - X_i$	$X_1^*$	$m_1$	$P_1$
2	$X_1 - X_2$	$X_2^*$	$m_2$	$P_2$
....	....	.....	....	....
$K$	$X_{k-1} - X_{k max}$	$X_k^*$	$m_k$	$P_k$

На основе статистического ряда можно построить:

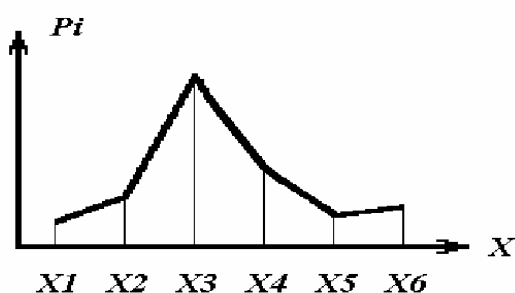


Рис.1.8. Полигон частостей

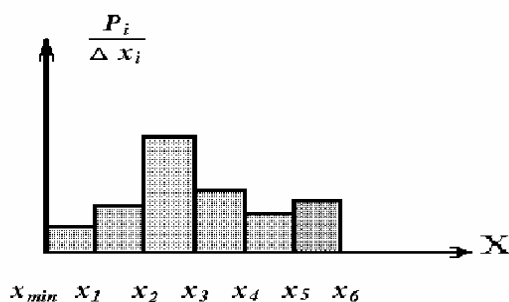


Рис.1.9. Гистограмма - аналог плотности распределения

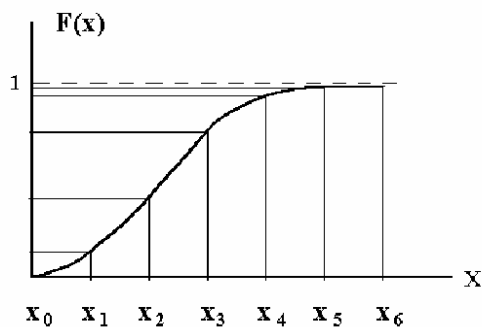


Рис.1.10. Эмпирическая функция распределения F(x)



Полигон частостей удобен для анализа распределения дискретных случайных величин, а гистограмма, для анализа распределения непрерывной величины.

Статистическая функция распределения характеризует вероятность события  $X < x$  в рассматриваемом ряде. На границе разрядов:

$$F(x_i) = \sum_{j=1}^{j=i} P_j, \quad (1.57)$$

Числовые характеристики сгруппированного ряда определяются из выражения:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^k P_i X^*_i = \frac{\sum_{i=1}^k m_i X^*_i}{n}, \quad (1.58)$$

$$D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k m_i (x^*_i - \bar{x})^2. \quad (1.59)$$

При ( $n > 50$ ) можно делить не на ( $n-1$ ), а на  $n$ , т.е

$$D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k m_i (x^*_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^k P_i (x^*_i - \bar{x})^2, \quad (1.60)$$

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (1.61)$$

### 1.6. Установление закона распределения и определение его параметров

В тех случаях, когда закон распределения полученной статистики не известен, одной из задач при обработке данных исследования (эксперимента) является установление закона распределения и определение его параметров.

Наиболее простым методом для установления закона распределения является использование вероятностных бумаг соответствующих законов распределения и оценка значимости расхождения статистики наблюдений с рассматриваемым законом (проверка гипотез).

Рассмотрим это на примере применения нормального закона распределения. Полученная статистика наблюдений может быть описана функцией плотности распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.62)$$

или в виде функции распределения накопленной вероятности, имеющей вид S-образной кривой

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx . \quad (1.63)$$

Данную функцию изменением шкалы по вертикальной оси можно представить в виде прямой линии (линеаризовать). Для этого шкалу  $F(x)$  в интервале от 0 до 1 преобразуем в шкалу по  $(y)$  в интервале от  $-\infty$  до  $+\infty$ , что показано на рис.1.11.

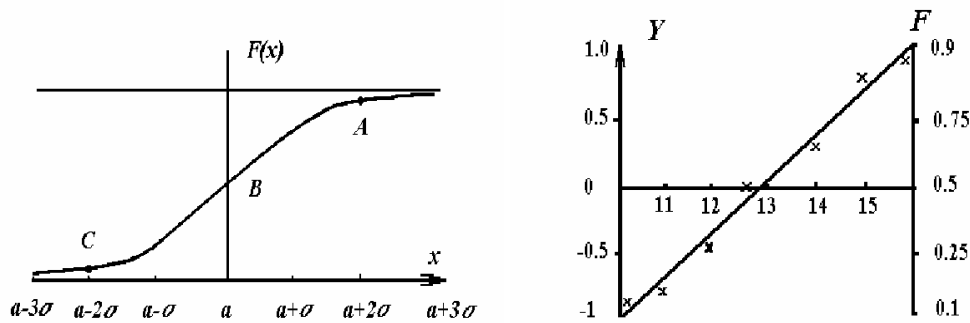


Рис. 1.11

Представим данные в виде таблицы

$i$	$X_i$	$F=m_i/n$	$y$
1	10.3	0.125	1.150
2	11.9	0.250	0.674
3	12.6	0.375	-0.319
4	12.6	0.500	0
5	13.8	0.625	0.319
6	14.5	0.750	0.674
7	15.7	0.875	0.150

Здесь  $F$  - накопленная частость

$$F = \frac{m_i}{n+1} = (1/8; 2/8; \dots; 7/8),$$

$$\bar{a} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{n} = 13.057 .$$

Значение  $Y$  находят из стандартных статистических таблиц или из уравнения:

$$F = \int_{-\infty}^{y(F)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{S^2}{2}} dS , \quad (1.64)$$

где  $S = \frac{x - \bar{a}}{\sigma}$ .

Из построенного таким образом графика находим параметры распределения:

$\mu = \bar{a} = 13.08$  - (точка пересечения прямой с осью  $X$ );

$\sigma = 2.20$  - (размах графика по  $Y$  относительно оси  $X$ ).

### 1.7. Проверка гипотез, критерии значимости и согласия

Проводя обработку полученных результатов исследования (данных наблюдения) с использованием вероятностных бумаг тех или иных законов распределения, мы принимаем гипотезу о выполнимости данного закона.

Насколько эта гипотеза достоверна позволяют судить критерии значимости и согласия. Среди статистик, применяемых в критериях значимости и согласия, наиболее важным является критерий Пирсона –  $(\chi^2)$ . При проверке гипотез возможны ошибки 2-х родов.

- *ошибка 1-го рода* состоит в том, что нулевая гипотеза  $H_0$  отвергается, тогда как она верна.
- *Ошибка 2-го рода* состоит в том, что гипотеза  $H_0$  принимается в то время, когда она на самом деле неверна.

Критерии значимости указывают величину риска сделать ошибку 1-го рода, но на основании этого критерия нет возможности составить заключение относительно величины риска сделать ошибку 2-го рода.

Вероятность ошибочного отбрасывания проверяемой гипотезы обозначается через  $\alpha$ , а вероятность ошибочного принятия через  $\beta$ .

Допустимую ошибку первого рода можно обычно задать заранее. Ее вероятность принимается равной 0.05 (то есть в 5 случаях из 100 верная гипотеза будет отвергнута).

Если в качестве критерия принята некоторая величина  $U$ , которая выражает различие среднего значения выборки  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и среднего значения функции принятой гипотезы -  $(M)$ , т.е.

$$U = \sum (\bar{x} - M)^2 \frac{1}{M},$$

то вычисляя на основе “нулевой гипотезы” функцию ее распределения, можно получить два вида распределения, соответствующие двум конкурирующим гипотезам  $H$  и  $\bar{H}$ . (см. рис.1.12):

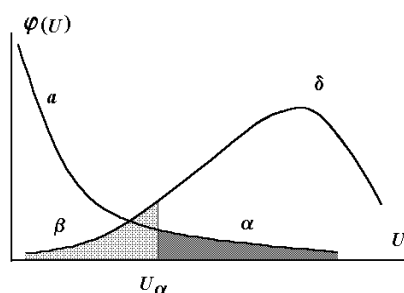


Рис. 1.12.

**а** - верна гипотеза  $H$ ;  
**б** - верна гипотеза  $\bar{H}$

Здесь  $U_\alpha$  - граница, определяющая ошибочность принятия той или иной гипотезы. При  $U > U_\alpha$  можем сказать, что либо справедлива гипотеза  $H$ , а произошло чисто случайное отклонение (выброс) величины  $U$ , либо более правдоподобна гипотеза  $\bar{H}$ .

### 1.8. Критерий Согласия Пирсона - ( $\chi^2$ )

Согласно критерию Пирсона, величина  $P(\chi^2)$  дает возможность судить о согласии между гипотезой и наблюдаемыми данными.

Применительно к нормальному закону распределения:

$$P(\chi^2) = \frac{1}{2}[1 - \Phi(x)]. \quad (1.65)$$

В приложениях статистики используют выражение

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_j - \bar{n}_j)^2}{\bar{n}_j}, \quad (1.66)$$

здесь  $n_j$  - наблюдаемые;

$\bar{n}_j$  - ожидаемые (выравнивающие) частоты.

При употреблении критерия согласия  $P(\chi^2)$  важное значение имеет правильный выбор (подсчет) числа степеней свободы:

$$\nu = k - q,$$

где  $\nu$  - число степеней свободы;

$k$  - число разрядов;

$q$  - число параметров закона распределения (число связей).

В случае нормального закона распределения

$$\nu = k - 3.$$

Все расчеты по определению  $\chi^2$  проводятся по схеме, приведенной в табл.3.

Таблица 3

I	Ширина разряда для - x <sub>j</sub>	Число наблюдений n <sub>j</sub>	Теоретическая частота $\bar{n}_j$	n <sub>j</sub> - $\bar{n}_j$	(n <sub>j</sub> - $\bar{n}_j$ ) <sup>2</sup>	$\frac{(n_j - \bar{n}_j)^2}{\bar{n}_j}$	$\frac{n_j^2}{\bar{n}_j}$
1	0 - 50	7	6.42	0.58	0.3364	0.05	7.63
2	50- 100	20	19.47	0.53	0.2809	0.01	20.54
3	100-150	44	48.9	-4.9	24.01	0.49	39.59
4	150-200	87	83.89	3.11	9.6721	0.12	90.23
5	200-250	100	98.35	1.65	2.7225	0.03	101.68
6	250-300	79	78.79	0.21	0.0441	0.00	79.21
7	300-350	42	43.12	-1.12	1.2544	0.03	40.91
8	350-400	16	16.13	-0.13	0.0169	0.00	15.87
9	400-450	5	4.93	0.07	0.0049	0.00	5.07
	Σ	400	400	-6.15 +6.15	-	0.73= $\chi^2$	400.73 -400.00

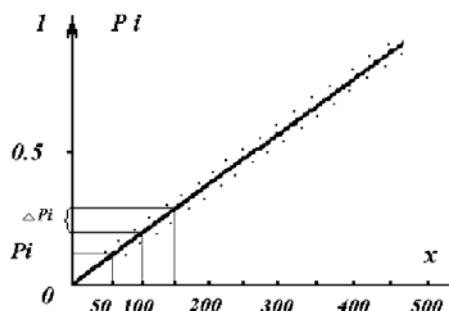


Рис.1.13. Функция распределения вероятностей наблюдаемых значений  $x_i$

Значение  $n_j$  находим из графика как число точек, попадающих в данный разряд. Величина  $\bar{n}_j$  - это ожидаемое число, определяемое по величине частоты  $\Delta P_i$  для данного разряда.

Для  $\chi^2 = 0.73$  из стандартных таблиц для  $P(\chi^2)$  при  $\nu = 6$  найдем  $P(\chi^2) = 0.99$ .

Таким образом, вероятность случайного расхождения между наблюдаемыми и выравнивающими частотами не менее чем 0.99. Это означает, что полученные расхождения являются случайными и нормальный закон распределения согласуется с наблюдаемыми данными.

## Глава 2. Электрическое поле в электроизоляционных конструкциях

### 2.1. Общие понятия об электрическом поле. Классификация электрических полей, создаваемых различными электродными системами

С точки зрения диалектики, электрическое поле представляет определенную форму материи, порождаемую при взаимодействии электрических зарядов друг с другом (одинаковых или противоположных знаков).

Количественной характеристикой электрического поля служат напряженность электрического поля  $E$ , разность потенциалов  $\varphi$  или  $U$ , величина заряда  $Q$ , или его поверхностная -  $\sigma$ , или объемная -  $\rho$  плотность.

К характеристикам электрического поля относятся также электрическая индукция -  $D$  и вектор электрического смещения -  $N$ , которые связаны с напряженностью электрического поля  $E$  определенными соотношениями.

Графически электрическое поле можно изобразить силовыми и эквипотенциальными линиями, которые взаимно перпендикулярны друг к другу.

**Силовая линия** - это линия, указывающая направление действия силы на положительный заряд.

**Эквипотенциальная линия** - это линия равного потенциала.

С помощью силовых линий можно задать не только направление действия силы, но и ее величину, изменяя густоту этих линий. Для графического построения электрического поля необходимо выполнить определенные условия:

1. Поверхность электродов принимается за крайние эквипотенциали.
2. Пересечение силовых и эквипотенциальных линий должно происходить под прямым углом (взаимно перпендикулярно).
3. В силовой трубке соотношение осей везде должно быть одинаковым и постоянным.

Классификацию электрических полей, создаваемых различными электродными системами в ЭИС можно провести по двум признакам:

**а) по степени однородности (равномерности) электрического поля;**

1. Однородное (равномерное);
2. Слабо неоднородное;
4. Резко неоднородное.

Примером однородного электрического поля может служить поле плоского конденсатора с закругленными краями и бесконечно протяженными пластинами (электроды Роговского). В этом случае имеет место равномерное распределение силовых линий (см. рис. 2.1).

Для неравномерного (неоднородного) электрического поля наблюдается сгущение силовых линий в области электрода с меньшим радиусом кривизны. Количественной мерой степени неоднородности электрического поля может служить коэффициент неоднородности

$$k = \frac{E_{max}}{E_{cp}}, \text{ где } E_{max} \text{ и } E_{cp} \text{ – соответственно максимальная и средняя напряженности поля в промежутке.}$$

При  $k \geq 3$  электрическое поле считается резконеоднородным.

При  $k \geq 3$  электрическое поле считается резконеоднородным.

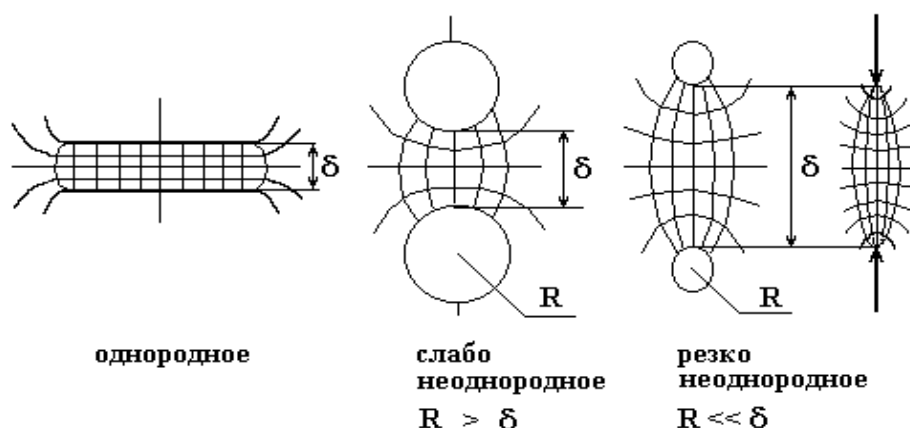


Рис.2.1

**б) по распределению в пространстве различают:**

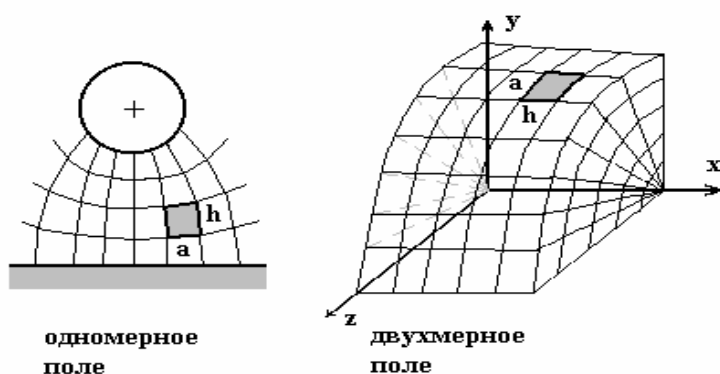
1. Плоскопараллельное;
2. Плоскомеридианное;

## 3. Одно -, двух -, трехмерное.

Плоскопараллельными называются поля, форма которых одинакова в параллельных плоскостях. В такой плоскости всегда можно провести прямую, где потенциал будет сохранять постоянное значение и может быть описан функцией  $\varphi = f(x,y)$ .

Плоскомеридианное поле, как правило, имеет форму тел вращения и встречается наиболее часто (подвесные изоляторы, шаровые разрядники и др.). Такое поле всегда неоднородно.

Картина распределения силовых и эквипотенциальных линий в одномерном и двухмерном поле показана на рис.2.2.



**Рис. 2.2.** Распределение силовых линий в одномерном и двухмерном электрическом поле

*Для исследования электрического поля* используют различные методы, к которым относятся графический, экспериментальный (электролитическая ванна, метод зондов и др.) и аналитический (расчетный).

Экспериментальные методы, как и графический метод, сводятся к построению картины электрического поля с использованием силовых и эквипотенциальных линий.

Несколько более широкие возможности имеют аналитические методы, которые наряду с количественным определением основных характеристик электрического поля позволяют воссоздать и его графическую картину. Эти методы нашли широкое применение для моделирования и расчета электрических полей.

## **2.2. Аналитические методы определения характеристик электрического поля**

### **2.2.1. Использование дифференциальных уравнений**

а) Согласно закону Кулона, при взаимодействии точечных электрических зарядов напряженность электрического поля может быть рассчитана:

$$E = -\frac{F}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cdot \left[ \frac{B}{M} \right]. \quad (2.1)$$

В том случае, когда электрический заряд рассредоточен внутри или на поверхности какого-то заряженного тела (шара) для вычисления напряженности электрического поля необходимо знать объемную или поверхностную плотность электрических зарядов ( $\rho$  или  $\sigma$ ). Для этого нужно заряженное тело мысленно разбить на бесконечное множество малых частей (которые можно принять за элементарные), вычислить напряженность электрического поля, создаваемую каждым участком как точечным зарядом, а затем произвести суммирование, т.е.:

$$\rho = \lim \frac{\Delta q}{\Delta V} \quad (2.2) \quad \text{или} \quad \sigma = \lim \frac{\Delta q}{\Delta S} . \quad (2.3)$$

б) Вычисление напряженности электрического поля сильно упрощается, если использовать понятие электрической индукции ( $D = \epsilon\epsilon_0 E$ ) и потока вектора электрического смещения -  $N$ .

Согласно теории электромагнетизма, взаимосвязь основных характеристик электрического и магнитного полей описывается уравнениями Максвелла в интегральной и дифференциальной форме:

<i>Интегральная форма</i>	<i>Дифференциальная форма</i>	
$\oint H ds = \int (\sigma E + \epsilon\epsilon_0 \frac{dE}{dt}) ds$	$rot H = \sigma E + \epsilon\epsilon_0 \frac{dE}{dt}$	(2.4)
$\oint E ds = - \frac{d}{dt} \int B dA$	$rot E = - \frac{dB}{dt}$	(2.5)
$\oint D ds = \oint \rho dV = Q$	$Div D = \rho$	(2.6)
$\oint B ds = 0$	$Div B = 0$	(2.7)

В случае электростатического поля, когда характеристики поля не изменяются во времени, а удельное сопротивление среды (диэлектрика) велико, характеристики электрического и магнитного полей можно рассматривать отдельно, т.е. ограничиться только уравнениями (2.5, 2.6).

Из уравнения (2.6) следует, что интеграл по замкнутой поверхности  $S$  равен заряду  $Q$ , заключенному в объёме, ограниченной этой поверхностью. Действительно, если вокруг точечного заряда взять сферу радиусом ( $a$ ), то из уравнения (2.6) следует:



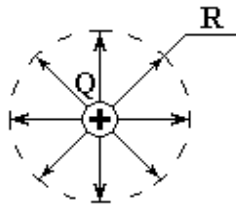


Рис.2.3

$$DdS = D4\pi a^2 = Q$$

$$D = \frac{Q}{4\pi a^2} \quad (2.8)$$

С учетом уравнения (1)

$$D = \epsilon\epsilon_0 E \quad (2.9)$$

Уравнение (2.6) называется первым основным законом электрического поля, а уравнение (2.9) – вторым законом. Опираясь на эти законы, в теоремах Гаусса-Остроградского было показано:

а) для плоского конденсатора (Рис.2.4.)

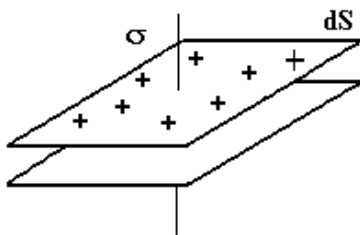


Рис.2.4

$$\int DdS \Rightarrow \sum q \Rightarrow \sigma \cdot dS, \text{ т.е.}$$

$$D = \sigma \quad \text{Отсюда:}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}; \quad (2.10)$$

б) для цилиндрического конденсатора (Рис.2.5.)

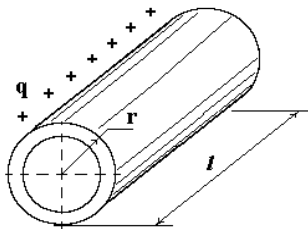


Рис.2.5

$$\int DdS \Rightarrow \int D2\pi r l \Rightarrow ql, \text{ т.е.}$$

$$D2\pi r l = ql, \text{ тогда}$$

$$E = \frac{q}{2\pi r \epsilon\epsilon_0}; \quad (2.11)$$

в) для сферического конденсатора (Рис.2.6)

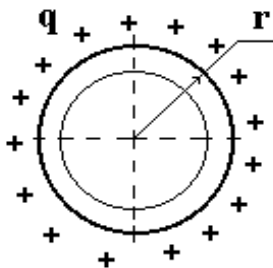


Рис.2.6

$$\int DdS \Rightarrow \int D4\pi r^2 \Rightarrow q, \text{ т.е.}$$

$$D = \frac{q}{4\pi r^2}, \text{ тогда}$$

$$E = \frac{q}{4\pi r^2 \epsilon\epsilon_0}. \quad (2.12)$$

Из основных законов вытекают следующие свойства:

⇒ **электрическое поле – это поле источников;**

$$\lim \frac{1}{V} \oint D dS = \text{div} D = \rho \quad (2.13)$$

⇒ **электрическое поле не вихревое.**

Если заряд проходит в электрическое поле по замкнутой траектории, то при этом совершается работа, равная нулю.

$$W = Q \oint E dS = \oint F dS = 0. \quad (2.14)$$

Если заряд перемещается из точки **1** в точку **2**, то в этом случае совершается работа, отличная от нуля (не зависящая от траектории движения).

$$W = Q \int E dS \neq 0. \quad (2.15)$$

⇒ **интеграл в уравнении (2.14) дает разность потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) или напряжение  $U_{12}$  между точками 1-2.**

$$\int_1^2 E dS = \varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}. \quad (2.16)$$

Из выражения (2.16) можно выразить:

$$E = -\text{grad} \varphi \quad \text{или}$$

$$E = -\frac{d\varphi}{dx}. \quad (2.17)$$

Из этого следует, что напряженность электрического поля характеризует скорость изменения потенциала в направлении силовой линии.

Решая совместно (2.17, 2.13, 2.9), получаем:

$$\text{div}[\varepsilon\varepsilon_0(-\text{grad}\varphi)] = \rho \quad \text{или}$$

$$\text{divgrad}\varphi \equiv \Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0}. \quad (2.18)$$

Это потенциальное уравнение Пуассона, где  $\Delta$ -оператор Лапласа.

В зависимости от формы электродов и системы координат различают:

⇒ Декартова система  $\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}; \quad (2.19)$

⇒ Цилиндрическая  $\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial \beta^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}; \quad (2.20)$

⇒ Сферическая

$$\Delta\varphi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial\varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin\theta \frac{\partial\varphi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial\varphi}{\partial \beta}. \quad (2.21)$$

Вычисление потенциала в этих случаях сводится к решению дифференциального уравнения Лапласа. Рассмотрим это на примерах.

⇒ Плоскопараллельное поле (поле плоского конденсатора)

При  $\rho = 0$ , т.е. при отсутствии пространственного объёмного заряда

$$\Delta \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0. \quad (2.22)$$

При  $\rho \neq 0$ , т.е. при наличии пространственного объёмного заряда

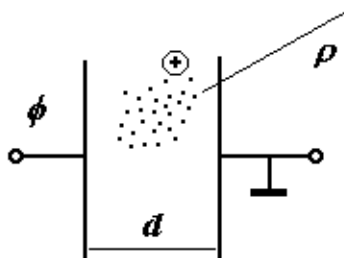
$$\Delta \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}. \quad (2.23)$$

Дважды проинтегрируем это уравнение и найдем постоянные  $C_1, C_2$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{\rho x}{\epsilon \epsilon_0} + C_1, \quad (2.24)$$

$$\varphi = -\frac{1}{2} \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} x^2 + C_1 x + C_2.$$

Для нахождения постоянных интегрирования составим граничные условия:



При  $x = 0$   $\varphi = U$ , а при  $x = d$   $\varphi = 0$ , отсюда  $C_2 = U$ , а

$$C_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} d - \frac{U}{d},$$

рис.2.7

$$\varphi = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} d \right) x^2 (d - x) + U \left( 1 - \frac{x}{d} \right). \quad (2.25)$$

Согласно полученному уравнению построим графики изменения потенциала и напряженности поля по длине промежутка ( $x$ ) при  $\rho = 0$  и при  $\rho \neq 0$  (см. рис.2.8).

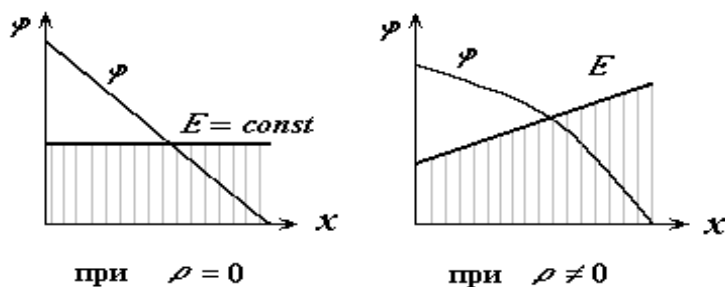


Рис. 2.8. Изменение потенциала и напряженности поля по длине промежутка

⇒ В случае сферических электродов (сфера-сфера), где характеристики поля меняются только в радиальном направлении, то  $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$  и  $\frac{\partial}{\partial \beta} = 0$ .

Поэтому дифференциальное уравнение Лапласа при  $\rho = 0$  принимает форму:

$$\Delta \varphi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0. \quad (2.26)$$

Сделаем замену, обозначив  $r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} = K_1$ , тогда после интегрирования по-

$$\text{лучим } \varphi(r) = -\frac{K_1}{r} + K_2. \quad (2.27)$$

Постоянные  $K_1$  и  $K_2$  найдем из граничных условий, зная потенциалы электродов.

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(r_1) = \varphi_1 = -\frac{K_1}{r_1} + K_2 \\ \varphi(r_2) = \varphi_2 = -\frac{K_1}{r_2} + K_2 \\ \varphi_1 - \varphi_2 = U \end{array} \right.$$

Решая данную систему уравнений, находим:

$$K_1 = \frac{U}{\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}}; \quad K_2 = \frac{U}{\frac{r_1}{r_2} - 1} + \varphi_1.$$

График распределения напряженности поля в данной системе электродов показан на рис.2.9.

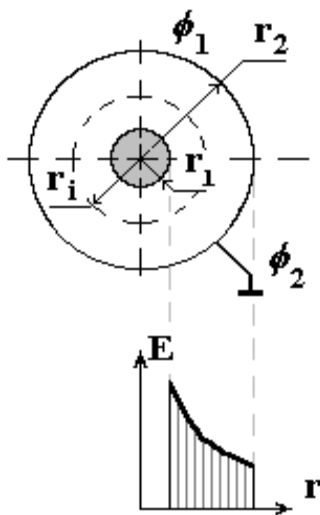


Рис. 2.9

После подстановки найдем:

$$\varphi(r) = \varphi_1 + \frac{U}{\frac{r_1}{r_2} - 1} - \frac{1}{r} \frac{U}{\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}}. \quad (2.28)$$

Значения напряженности электрического поля рассчитаем:

$$E = -grad\varphi = -\frac{d\varphi(r)}{dr} = \frac{1}{r^2} \frac{U \cdot (r_1 \cdot r_2)}{(r_1 - r_2)}. \quad (3.29)$$

⇒ В случае цилиндрических электродов (цилиндрического конденсатора) бесконечно большой длины можно воспользоваться дифференциальным уравнением Лапласа для цилиндрической системы координат

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial r} = 0. \quad (2.30)$$

Решением данного дифференциального уравнения будет  $\varphi(r) = K_1 \ln r + K_2$

При  $\varphi(r_1) = \varphi_1$   
 $\varphi(r_2) = \varphi_2$  найдем  $K_1 = \frac{U}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$ ;  
 $\varphi_1 - \varphi_2 = U$

$$K_2 = \varphi_1 - \frac{U}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln r_1;$$

тогда  $\varphi(r) = \varphi_1 + \frac{U}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} (\ln r - \ln r_1).$  (2.31)

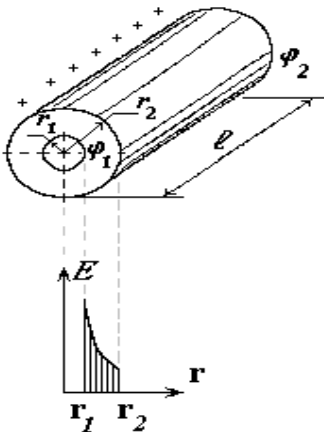


Рис.2.10

Распределение напряженности поля (рис.2.10) найдем аналогично, как и для сферического конденсатора:

$$E = -grad\varphi = -\frac{d\varphi}{dr} = \frac{1}{r} \cdot \frac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}. \quad (2.32)$$

Аналогичное уравнение можно получить, если представить данный конденсатор в виде последовательно соединенных конденсаторов с толщиной слоя диэлектрика ( $dr$ ). В этом случае:

$$C_i = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{dr} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot l 2\pi r}{dr}, \text{ тогда } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

С другой стороны,  $\frac{1}{C} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{2\pi r \varepsilon\varepsilon_0 l} dr,$

тогда

$$E = \frac{q}{\oint \varepsilon \varepsilon_0 dS} = \frac{CU}{\oint \varepsilon \varepsilon_0 dS} = \frac{2\pi \varepsilon \varepsilon_0 \ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{U}{2\pi r \varepsilon \varepsilon_0 \ell} = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (2.33)$$

### 2.2.2. Способ эквивалентных зарядов

Способ эквивалентных зарядов может быть основан:

- ⇒ На использовании обоих основных законов;
- ⇒ На использовании метода наложения.

#### 1. Использование основных законов

$$\oint_A D dA = Q; \quad D = \varepsilon \varepsilon_0 E$$

В этом случае с помощью первого закона определяется плотность смещения, а с помощью второго закона напряженность поля, а затем находится неизвестный заряд ( $Q$ ).

Этот метод применим лишь в случаях, когда заряд может быть выражен в аналитическом виде согласно первому закону, как интеграл плотности смещения по замкнутой поверхности. Рассмотрим это на примере цилиндрического конденсатора (см. рис. 2.9):

$$Q = \oint D dA = D(r) A = D(r) 2\pi r \ell; \quad (2.34)$$

$$E(r) = \frac{D(r)}{\varepsilon \varepsilon_0} = \frac{Q}{2\pi \varepsilon \varepsilon_0 \ell}; \quad (2.35)$$

$$U(r) = \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr = \frac{Q}{2\pi \varepsilon \varepsilon_0 \ell} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (2.36)$$

Исключаем неизвестный заряд  $Q$

$$U(r) = \frac{2\pi r \ell \cdot E(r) \varepsilon \varepsilon_0}{2\pi \varepsilon \varepsilon_0 \ell} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (2.37)$$

Отсюда

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (2.38)$$

Зная  $U(r)$  или  $E(r)$ , можно найти неизвестный заряд  $Q$ .

## 2. Способ наложения

Это способ эквивалентных зарядов, когда большое число единичных зарядов размещают таким образом, что их суммарное воздействие создает требуемые эквипотенциальные поверхности. Данный метод имеет большое значение при рассмотрении электрического поля, создаваемого проводниками, расположенными над заземленной поверхностью (провода ЛЭП, обмотка статора или ротора электрической машины).

Рассмотрим это на примере проводника (рис.2.11), расположенного над землей, у которого имеется заряд  $Q$ , распределенный по длине.

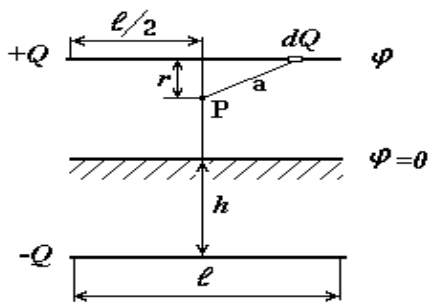


Рис.2.11

Исходя из обоих законов электрического поля, можно показать, что точечный заряд в произвольной точке (**P**) на расстоянии (**a**) создает потенциал

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 a}. \quad (2.39)$$

В нашем случае это можно представить как

$$d\varphi = \frac{dQ}{4\pi\epsilon\epsilon_0 a(x)}. \quad (2.40)$$

Интегрирование по длине дает в точке (**P**) потенциал

$$\varphi = \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \frac{dQ(x)}{4\pi\epsilon\epsilon_0 a(x)} \quad (2.41)$$

при  $dQ(x) = \frac{Q}{\ell} dx = q dx$ ,  $a(x) = \sqrt{x^2 + r^2}$ ,

тогда

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \frac{1}{\sqrt{x^2 + r^2}} dx = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{\frac{1}{2} + \sqrt{r^2 + \left(\frac{\ell}{2}\right)^2}}{-\frac{1}{2} + \sqrt{r^2 + \left(\frac{\ell}{2}\right)^2}}, \quad (2.42)$$

так как  $\ell \gg r$ , то

$$\varphi \approx \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{\ell + \left(\frac{r^2}{\ell}\right)}{r^2 \ell} = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{\ell}{r}. \quad (2.43)$$

Вместо заземленной поверхности введем зеркально отображенный, такой же по величине линейный заряд  $(-Q)$ .

В точке  $(P)$  на расстоянии  $r \ll h$

$$\varphi = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \ln \frac{\ell}{r} - \ln \frac{\ell}{2h-r} \right) = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{2h-r}{r}. \quad (2.44)$$

Если  $r \ll h$  можно выражение упростить

$$\varphi \cong \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r}. \quad (2.45)$$

Напряжение на поверхности провода относительно земли (при  $r = r_1$ )

$$U = \varphi(r_1) - 0 = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{2h}{r_1}. \quad (2.46)$$

Напряженность поля

$$E(r_1) = -\frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{r_1} = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{1}{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{2h}{r_1}}. \quad (2.47)$$

Необходимо отметить, что последнее уравнение не является цилиндрически симметричным, т.е. является приближенным. Более точный расчет с учетом всех составляющих дает:

$$E = \frac{2U}{\sqrt{h^2 + x^2} \ln \left( \frac{2h}{r} \right)} \cos \left( \arctg \frac{x}{h} \right). \quad (2.48)$$

$$\text{При } x = 0, \quad E = E_{\max} = \frac{2U}{h \ln \frac{2h}{r_1}}. \quad (2.49)$$

### 2.2.3. Метод конформных отображений

Более широкими возможностями для расчета электрического поля различных электродных систем обладает метод конформных отображений.

Это метод анализа неизменных во времени двумерных электрических и магнитных полей, удовлетворяющих уравнению Лапласа.

Конформное отображение заключается в геометрическом преобразовании заданной системы электродов в систему электродов, для которой известно распределение потенциалов.



Для таких преобразований используются различные отображающие функции.

Расположим оси декартовой системы в исследуемом поле так, чтобы ось  $Z$  была перпендикулярна полю. Тогда положение точки на плоскости  $Z(x,y)$  будет характеризоваться координатами в комплексной форме:

$$Z = x + jy. \quad (2.50)$$

Совокупность точек  $(x,y)$ , принадлежащих эквипотенциальной линии, обозначим  $U=U(x,y)$ , а совокупность точек, принадлежащих силовой линии, обозначим  $V=V(x,y)$ . Так как силовые и эквипотенциальные линии взаимно перпендикулярны, то одну из данных функций можно принять в качестве действительной, а другую в качестве мнимой части, т.е.

$$\omega = U + jV. \quad (2.51)$$

Число  $\omega$  называют комплексным потенциалом. Он описывает совокупность силовых и эквипотенциальных линий поля, т.е. его ортогональную сетку.

Если считать, что  $U$ -потенциальная функция, а  $V$ -функция потока, характеризующего это поле, то проекции вектора напряженности на осях  $x,y$  будут соответственно равны:

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}. \quad (2.52)$$

Отсюда модуль напряженности поля  $E$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \left| \frac{\partial \omega}{\partial z} \right|. \quad (2.53)$$

Исходя из определения, конформными преобразованиями будут являться преобразования совокупности точек плоскости  $z = x + jy$  в совокупность точек плоскости  $\omega = U + jV$ , осуществляемые с помощью аналитической функции  $\omega = f(z)$ :

$$\omega = U + jV = f(x + jy) = f(z) = \rho e^{j\varphi}. \quad (2.54)$$

Пересчет от напряженности поля  $E_\omega$  в плоскости  $\omega$  к напряженности  $E_z$  в исходной плоскости  $z$  производится согласно следующему соотношению:

$$E_z = E_\omega \frac{d\omega}{dz} \quad \text{или} \quad (2.55)$$

$$E_\omega = E_z \frac{dz}{d\omega}. \quad (2.56)$$

Следует отметить, что при переходе из одной системы координат  $\omega$  в другую  $z$  (или наоборот) происходит сохранение постоянства углов (см. рис.2.12).

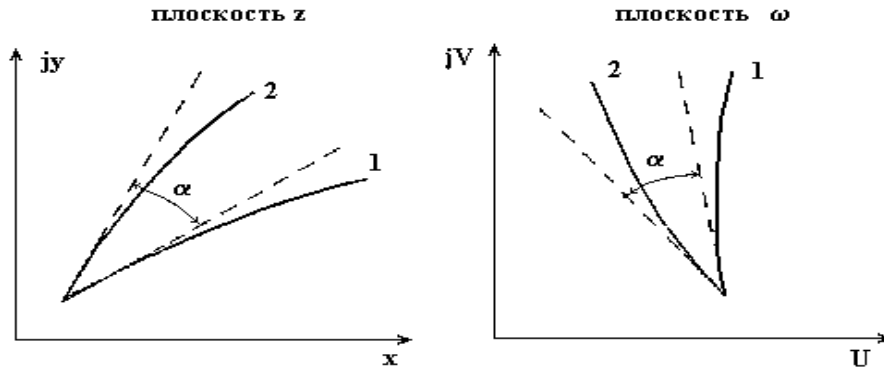


Рис.2.12

В качестве отображающей функции могут использоваться:

1. Показательная  $\omega = e^z$ .
2. Обратная  $\omega = 1/z$ .
3. Логарифмическая  $z = A \ln(\omega/r_0)$ .
4. Интеграл Шварца-Кристоффеля

$$\omega = \int \frac{cdz}{(z-a_1)\gamma_1(z-a_2)\gamma_2 \dots (z-a_n)\gamma_n}.$$

Функция  $\omega$  называется аналитической, если производная  $d\omega/dz = \lim(\Delta\omega/\Delta z)$  не зависит от направления, вдоль которого взято приращение  $\Delta z$ , т.е. производная должна быть одна и та же, если приращение  $dz$  один раз взять вдоль оси  $x$ , ( $dz = dx$ ), а другой раз вдоль оси  $y$  ( $dz = jdy$ ).

$$\text{Приращение вдоль } x \quad \Delta_x \omega = \Delta_x U + j\Delta_x V.$$

$$\text{Приращение вдоль } y \quad \Delta_y \omega = \Delta_y U + j\Delta_y V.$$

$$\text{Тогда } \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial x} + j \frac{\partial V}{\partial x}; \quad \frac{\partial \omega}{j \partial y} = -\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y},$$

т.к.  $\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial \omega}{j \partial y}$  то, приравнивая правые части, получаем:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad \text{- это уравнение Коши-Римана.} \quad (2.57)$$

После дифференцирования получим

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y}; \quad \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y}.$$

После их сложения

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0 \quad \text{- это уравнение Лапласа.} \quad (2.58)$$

**Преобразование равномерного поля на плоскости  $z$  в поле верхней полуплоскости  $\omega$  (рис.2.13)**

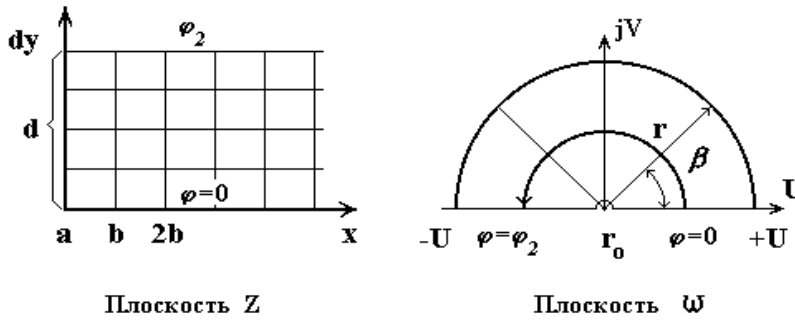


Рис.2.13

Координату некоторой точки на плоскости -  $\omega$  (рис.2.13) запишем в полярной системе координат

$$\omega = r \cdot e^{j\beta} \quad (2.59)$$

Свяжем переменные  $Z$  и  $\omega$  соотношением

$$z = x + jy = A \ln \frac{\omega}{r_0} = A \ln \frac{r \cdot e^{j\beta}}{r_0} = A \left( \ln \frac{r}{r_0} + e^{j\beta} \right) \quad (2.60)$$

Здесь  $A$  и  $r_0$  – некоторые постоянные,

$$\text{тогда: } x = A \ln \frac{r}{r_0}; \quad y = A \cdot \beta \quad (2.61)$$

На плоскости  $Z$  (рис.2.13) показано равномерное поле, образованное двумя плоскими электродами. Один электрод совпадает с осью  $x$  и имеет потенциал  $\varphi_1 = 0$ . Второй электрод удален от оси  $x$  на расстояние  $d$  и имеет потенциал  $\varphi_2$ . Эквипотенциали – это прямые, параллельные оси  $x$ , а силовые линии параллельны оси  $y$ .

На плоскости  $\omega$  при использовании полярной системы координат линии равного потенциала (эквипотенциали) будут соответствовать линиям ( $A\beta \neq \text{const}$ ), т.е. будут являться лучами, проведенными из начала координат, а силовые линии будут являться окружностями.

Положим, что эквипотенциаль  $y = d$  плоскости  $z$  отображена на плоскости  $\omega$  отрицательной полуосью ( $-U$ ), а эквипотенциаль  $y = 0$ , положительной полуосью ( $+U$ ).

Точке  $\omega = 0$  соответствует  $x = -\infty$ . Исходя из этого, определяем постоянную  $A$ . Согласно рис.3.12, полуоси ( $-U$ ) соответствует угол  $\beta = \pi$  (по направлению от  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \varphi_2$  по стрелке).

$$\text{Поэтому } y = d = A\beta = A\pi, \text{ т.е. } A = \frac{d}{\pi}.$$

Найдем соответствие между силовыми линиями в плоскости  $z$  и в плоскости  $\omega$ .

⇒ Силовой линии

$$x = 0 = A \ln \frac{r}{r_0} = \frac{d}{\pi} \ln \frac{r}{r_0}$$

соответствует полуокружность радиусом  $r = r_0$ , где  $r_0$  – произвольный радиус, играющий роль единицы измерения.

⇒ Силовой линии

$$x = b = A \ln \frac{r}{r_0} = \frac{d}{\pi} \ln \frac{r}{r_0}$$

соответствует полуокружность радиусом  $r = r_0 e^{\frac{b\pi}{d}}$ .

⇒ Силовой линии

$$x = 2b = A \ln \frac{r}{r_0} = \frac{d}{\pi} \ln \frac{r}{r_0}$$

соответствует полуокружность радиусом  $r = r_0 e^{\frac{2b\pi}{d}}$ .

Таким образом, поле в верхней полуплоскости  $\omega$ , конформно отображающее равномерное поле на плоскости  $z$ , образовано двумя полупрямыми, совпадающими с осью  $(+U)$  и  $(-U)$ , которые отделены друг от друга в точках  $\omega = 0$  и разность потенциалов между которыми равна  $\varphi_2$ .

### Применение интеграла Шварца-Кристоффеля

Рассмотрим картину поля на краю плоского конденсатора (рис.2.14). Оси координат на плоскости  $z$  расположим так, чтобы ось  $x$  совпала со средней линией конденсатора, а ее потенциал примем равным нулю. Верхний электрод, будучи параллелен оси  $x$ , удален от нее на расстояние  $-h$  и простирается от точки  $b$  до  $-\infty$ , и имеет потенциал  $\varphi_2$ .

На рис.2.14 (б) ломаной линией  $z_0-z_1-z_2\dots\dots z_n$  в данном случае является линия, состоящая из 3-х участков.

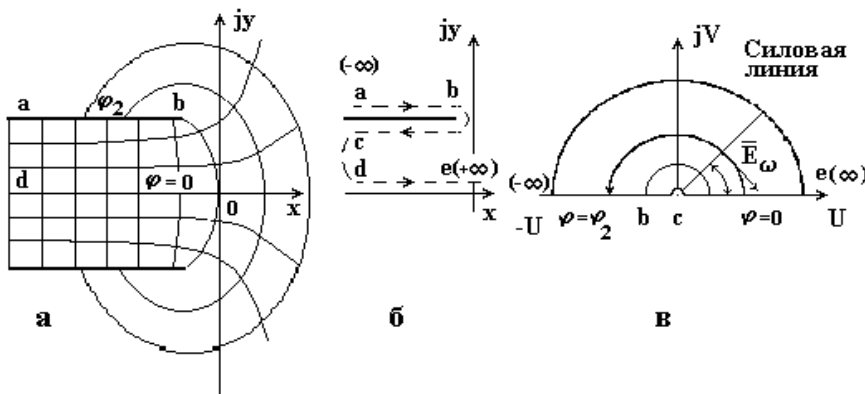


Рис.2.14

- ⇒ Первый участок идет по верхней части электрода из точки  $a$  ( $-\infty$ ) до точки  $b$ . Участок расположен параллельно оси  $x$ , поэтому  $\gamma\pi=0$ .
- ⇒ Второй участок идет от точки  $b$  до точки  $c$  ( $-\infty$ ) и проходит по нижней части электрода. Так как угол между 1-м и 2-м участком вдается в поле и численно равен  $\pi$ , то  $\alpha_1=1$
- ⇒ Третий участок идет от точки  $c$  ( $-\infty$ ) до точки  $e$  вдоль положительного направления оси  $x$  ( $+\infty$ ). В данном случае при переходе от 2-го участка к 3-му электрическое поле вдается в электрод, поэтому  $\alpha_2=-1$

$$dz = A(\omega - U_1)^{\alpha_1} (\omega - U_2)^{\alpha_2} \dots (\omega - U_n)^{\alpha_n} e^{j\gamma\pi} d\omega \quad (2.62)$$

Здесь  $A$  - некоторая постоянная;  $U_1, U_2, \dots, U_n$  - точки на оси  $U$ , соответствующие одноименным точкам  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$  (в нашем случае  $a, b, c, d, e$ ).

Линию  $ab$  плоскости  $z$  отразим на отрицательную полуось ( $-U$ ) плоскости  $\omega$  так, чтобы точка  $a$  находилась в точке  $U = -\infty$ ; точка  $b \rightarrow$  в точке  $U = -r_0 = -1$ ; точка  $c$  и  $d \rightarrow$  в точке  $U = 0$ ; точка  $e \rightarrow$  в точке  $U = +\infty$ .

Тогда можно записать:

$$dz = A(\omega + 1)^1 (\omega - 0)^{-1} d\omega; \quad (2.63)$$

$$z = x + jy = A \int (\omega + 1) \omega^{-1} d\omega + C_1 + jC_2; \quad (2.64)$$

$$z = A(\omega + r_0 \ln \frac{\omega}{r_0}) + C_1 + jC_2. \quad (2.65)$$

На плоскости  $\omega$  будем пользоваться полярной системой координат  $\omega = r e^{j\beta}$ . Разделяя действительные и мнимые части, находим:

$$x = A(r \cos \beta + r_0 \ln \frac{r}{r_0}) + C_1; \quad (2.66)$$

$$y = A(r \sin \beta + r_0 \beta) + C_2. \quad (2.67)$$

Определяем постоянные интегрирования  $C_1$ ,  $C_2$  и  $A$ .

Постоянную  $C_2$  найдем из условия, что для участка - ( $dc$ ) плоскости  $z$  имеем  $y = 0$ . Тогда подставляя  $\beta = 0$  и  $y = 0$  в уравнение (2.67) получаем  $C_2 = 0$ .

$$[0 = A(r \sin \pi + r_0 \cdot 0) + C_2].$$

Для нахождения  $A$  учтем, что для участка  $ab$  плоскости ( $z$ )  $y = h$ , а на плоскости ( $\omega$ ) этому участку соответствует  $\beta = \pi$ . Подставляя эти данные в уравнение (2.67), находим:

$$h = A(r \sin \pi + r_0 \pi) + 0, \text{ т.е. } A = \frac{h}{\pi}. \quad (2.68)$$

Подставляя данные, соответствующие точке  $b$  ( $x = -h/\pi$ ,  $\beta = \pi$ ) в уравнение (2.66), находим  $C_1 = 0$ . Учитывая, что  $r_0 = 1$ , переписываем эти уравнения:

$$x = \frac{h}{\pi} \left( r \cos \beta + \ln \frac{r}{r_0} \right); \quad (2.69)$$

$$y = \frac{h}{\pi}(r \sin \beta + \beta). \quad (2.70)$$

Эквипотенциалами на плоскости  $\omega$  являются прямые  $\beta = \text{const}$ .

Для построения на плоскости  $z$  эквипотенциали  $[\varphi = \text{const} (\varphi_2 > \varphi > 0)]$  поступаем следующим образом:

Находим угол  $\beta = \varphi/\varphi_2 \cdot \pi$ , подставляем найденное значение  $\beta$  в (2.69) и (2.70) и придавая отношению  $r/r_0$  различные значения, находим координаты  $x$  и  $y$  точек искомой эквипотенциали.

Для построения силовой линии в (2.69) и (2.70) положим, что теперь  $r = \text{const}$ , тогда изменяется угол  $\beta$  от  $0$  до  $\pi$ .

Напряженность поля  $\vec{E}_\omega$  на плоскости  $\omega$  определим из условия, что  $\pi r E_\omega = \varphi_2$ . Так как  $\vec{E}_\omega$  перпендикулярна эквипотенциальной линии, проведенной под углом  $\beta$  к оси  $(+U)$ , то  $\vec{E}_\omega$  с осью  $+U$  составляет угол  $(\beta - \pi/2)$ .

Таким образом:

$$\vec{E}_\omega = \frac{\varphi_2}{\pi r} e^{j\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)}. \quad (2.71)$$

Напряжение между какими-то двумя бесконечно близкими точками плоскости  $z$  и между соответствующими им точками плоскости  $\omega$  одинаково и равно

$$\vec{E}_z dz = \vec{E}_\omega d\omega, \quad (2.72)$$

отсюда

$$\vec{E}_z = \vec{E}_\omega \left( \frac{d\omega}{dz} \right), \quad (2.73)$$

подставляя значение  $\vec{E}_\omega$  из (2.71), а производной  $d\omega/dz$  из (2.63) и значение  $A = h/\pi$ , получаем:

$$\vec{E}_z = -j \frac{\varphi_2}{rh} \left( \frac{\omega}{\omega + r_0} \right) e^{j\beta}. \quad (2.74)$$

#### 2.2.4. Особенности расчета электрического поля в реальных ЭИК

Рассмотренные выше методы расчета электрических полей, несмотря на свою точность, во многих случаях не позволяют произвести расчет действующей напряженности электрического поля в реальных ЭИК. Это связано с тем, что в реальных ЭИК электрическая изоляция содержит различные неоднородности (проводящие или газовые включения, неоднородность по толщине и структуре, наличие внутренних напряжений и др.). Исходя из этого, на практике большое распространение получили эмпирические методы, основанные на большом экспериментальном опыте.

Так напряженность электрического поля  $E_r$  на расстоянии  $r$  от края электрода (обкладки) может быть рассчитана по формуле:

$$\text{при } r < 0.1d \quad E_r = \frac{U}{\sqrt{\pi dr}}. \quad (2.75)$$

Для оценки напряженности поля вблизи края фольговой обкладки можно воспользоваться также расчетом поля пластины с закругленным краем, расположенной против плоскости, или пластины с закругленным краем, заключенной между двумя симметрично расположенными плоскостями с одинаковым потенциалом (рис. 2.15).

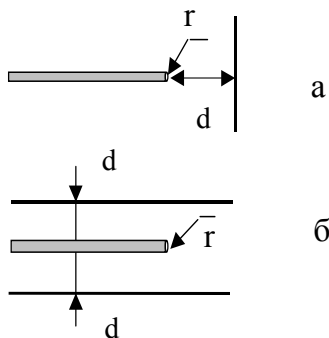


Рис.2.15

$$E_{\text{макс}} = GE_{cp} \sqrt{\frac{(d+r)}{r}}, \quad (2.76)$$

где  $E_{cp} = \frac{U}{d}$ .

При малых  $r \Rightarrow G = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$ , а при больших  $r \Rightarrow G \rightarrow 1$ .

При наличии в диэлектрике проводящего включения в виде шара (пузырька газа) радиусом -  $a$ , (см.рис.2.16) напряженность электрического поля на его поверхности может быть вычислена по формуле:

$$E = 3E_0 \cos \alpha, \quad (2.77)$$

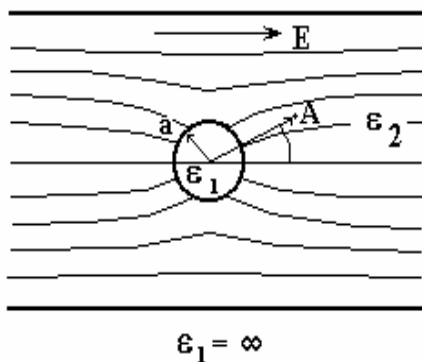


Рис.2.16

где  $E_0$  - напряженность однородного электрического поля;  $\alpha$  - угол радиуса-вектора, проведенного через данную точку относительно направления приложенного поля.

Искажение электрического поля будет наблюдаться и в том случае, когда включение является диэлектриком.

Если  $\epsilon_1 < \epsilon_2$ , то  $E_1 > E_2$ , тогда

$$E_1 = E_0 \cdot 3 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2}. \quad (2.78)$$

### 2.2.5. Регулирование электрического поля в ЭИК

Для уменьшения напряженности электрического поля в местах с повышенной неоднородностью поля в ЭИК применяют различные методы регулирования (выравнивания) электрического поля. Это позволяет снизить действующие на изоляцию нагрузки и продлить срок службы. Следует различать

особенности регулирования электрических полей для наружной (внешней) и внутренней изоляции.

Для наружной изоляции регулирование электрического поля может осуществляться за счёт применения различных экранов, специальной арматуры в виде колец, рогов, шаров и т.д., на которые может подаваться принудительный потенциал.

Для внутренней изоляции такие методы практически не применимы.

### 1. Метод экранов

Метод экранов позволяет повысить электрическую прочность воздушного промежутка за счёт предотвращения коронного разряда в области высоковольтного электрода. В этом случае, за счёт увеличения радиуса кривизны электрода повышается напряжение появления коронного разряда.

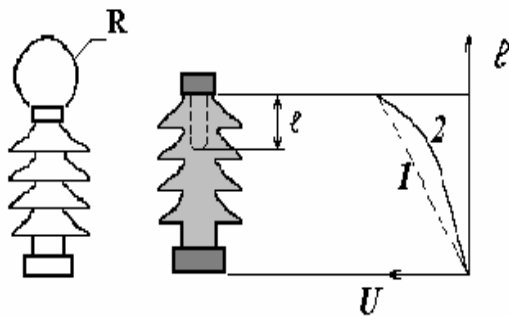


Рис.2.17

При этом могут использоваться как наружные, так и внутренние экраны, которые снижают напряженность поля в самом теле изолятора за счёт её перераспределения по длине (см. рис.2.17, где 1 - с внутренним экраном; 2 - без экрана).

В этом случае рабочая напряженность должна быть меньше напряженности развития короны.

$$E_{\text{раб}} < E_{\text{кор}} = 1.65 m \delta \left[ 1 + \frac{0.13}{(\delta R)^{0.38}} \right], \quad [\text{мВ/м}]. \quad (2.79)$$

Здесь  $m$ - коэффициент гладкости поверхности экрана,

$\delta$ - относительная плотность воздуха,

$R$ - радиус экрана в м.

### 2. Расщепление фазы в ЛЭП

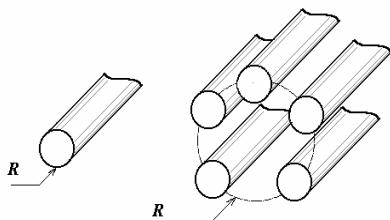


Рис.2.18

Расщепление фазы (рис.2.18), то есть применение вместо 1 фазного провода 3÷5 проводов в фазе позволяет увеличить  $R_{\text{эф.фазы}}$  и тем самым погасить развитие короны в ЛЭП на сверхвысокие напряжения. Это уменьшает и потери энергии.



### 3. Емкостной метод

Емкостной метод заключается в перераспределении электрического поля по емкостям отдельных элементов (частей) ЭИК.

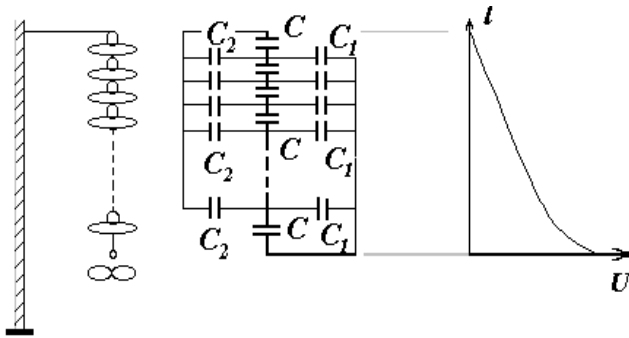


Рис.2.19

В гирлянде подвесных изоляторов (рис.2.19) такое перераспределение поля осуществляется за счёт емкости самих изоляторов -  $C$ , емкости по отношению к земле -  $C_1$  и емкости по отношению к проводу -  $C_2$ .

Так как суммарная емкость гирлянды равна  $C_2 = C/n$ , где  $n$  - число элементов в гирлянде, то  $C_2$  по величине близка к  $C_1$  и  $C$ .

Поэтому изменяя ёмкость  $C_1$  и  $C_2$  за счёт специальной арматуры (рогов, колец, восьмёрок), можно изменять характер распределения потенциала по длине гирлянды и тем самым снижать напряжённость поля.

### 4. Принудительное распределение потенциала

В данном случае для регулирования поля в колонне опорных изоляторов ГИН и ГИТ используются экраны в виде тороида, на которые принудительно подаётся соответствующий потенциал от самой установки (рис.2.20).

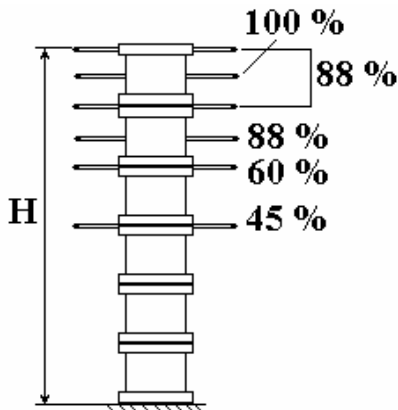


Рис.2.20

Это приводит к выравниванию поля по длине колонны и повышает напряжение  $E_{кор}$ .

Для тороида:

$$E_{кор} = 1.65m\delta\left(1 + \frac{0.108}{\delta^{0.5}r^{0.38}}\right), \text{ [МВ/м]},$$

где  $r$  – радиус тороида, м.

## 5. Применение барьеров

Применение барьеров для наружной изоляции используется только в коронирующих промежутках. В этом случае за счет коронного разряда у коронирующего электрода образуются заряды, которые, перемещаясь в электрическом поле, оседают на барьере и образуют на нём объёмный заряд того же знака. За счёт этого напряжённость электрического поля в промежутке уменьшается (рис.2.21).

Наиболее эффективно расположение барьера на расстоянии порядка 15-25% от коронирующего электрода. Рост электрической прочности промежутков с барьером имеет место в том случае, когда промежуток заполнен жидким диэлектриком. Это нашло применение при разработке ЭИК с маслобарьерной изоляцией. В этом случае роль барьера играют бумажно-бакелитовые цилиндры с бумажной подмоткой, разделённые между собой масляными каналами.

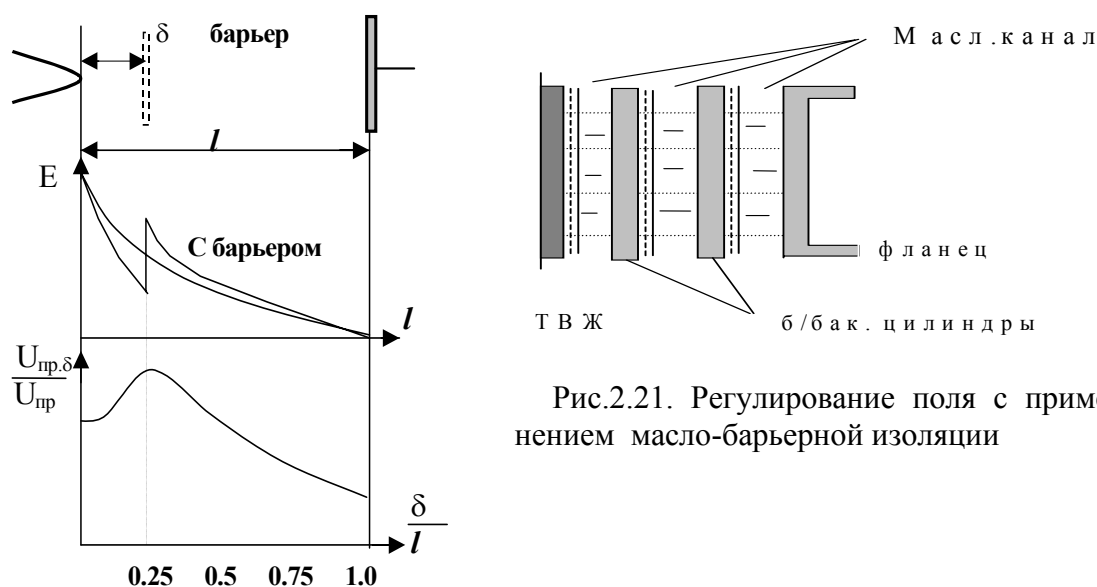


Рис.2.21. Регулирование поля с применением масло-барьерной изоляции

## 6. Регулирование электрического поля изменением диэлектрической проницаемости (метод градирования)

Метод градирования основан на перераспределении напряженности электрического поля в различных слоях диэлектрика, обладающих различными значениями диэлектрической проницаемости или проводимости. Такой метод нашел широкое применение при изготовлении кабелей (рис.2.22).

Согласно основному закону  $D = \varepsilon_1 \varepsilon_0 E_1 = \varepsilon_2 \varepsilon_0 E_2 = \dots = const.$

Отсюда следует, что  $\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2$  или  $\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2$ .

Тогда максимальные напряженности поля:

$$E_{\max 1} = \frac{U_1}{r_0 \ln(r_1/r_0)}; \quad E_{\max 2} = \frac{U_2}{r_1 \ln(r_2/r_1)}. \quad (2.80)$$

Минимальные напряженности поля:

$$E_{\min 1} = \frac{U_1}{r_1 \ln(r_1/r_0)}; \quad E_{\min 2} = \frac{U_2}{r_2 \ln(r_2/r_1)}. \quad (2.81)$$

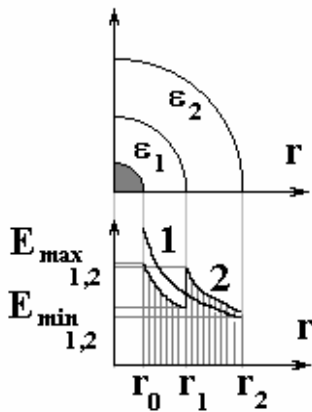


Рис.2.22

Так как  $2\pi r_1 \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 = 2\pi r_2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_2$ , то  $\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_2$ .

В случае многослойной изоляции:

$$E_{\max i} = \frac{U_i}{r_i \ln(r_{i+1}/r_i)}. \quad (2.82)$$

Для схемы замещения в виде последовательно соединенных конденсаторов  $U_i = \frac{UC}{C_i}$ ,

где  $C_i = \frac{2\pi \varepsilon_i \varepsilon_0}{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}$  - емкость  $i$ -го слоя цилиндри-

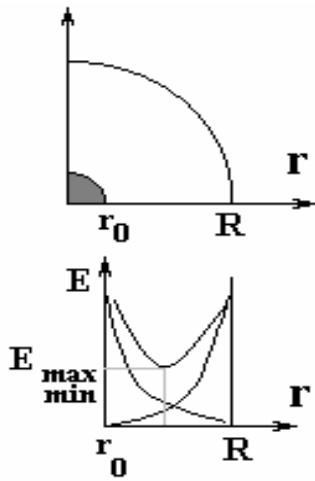
ческого конденсатора, а

$$C = \frac{2\pi \varepsilon_0}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}{\varepsilon_i} \right)}. \quad (2.83)$$

Решая совместно приведенные уравнения относительно напряженности электрического поля, находим:

$$E_i = \frac{U}{r_i \varepsilon_i \sum_{i=1}^n \left( \frac{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}{\varepsilon_i} \right)}. \quad (2.84)$$

Используя данные уравнения, можно решать задачу определения соотношения радиусов, при которых поле будет более однородным, т.е. будет обеспечиваться минимальное значение максимальной напряженности поля  $E_{\max \min}$  (рис.2.23).



$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \quad (2.85)$$

При  $r \rightarrow 0$ ,  $E \rightarrow E_{\max} \rightarrow \infty$ , также при  $R \rightarrow r$ ,  $E \rightarrow E_{\max} \rightarrow \infty$

Исходя из условия, что  $E_{\max \min}$  будет иметь место при  $\frac{dE}{dr} = 0$ , тогда  $E_{\max} \rightarrow E_{\max \min}$ , когда

$$\frac{R}{r} = e.$$

Рис.2.23

### 7. Применение полупроводящих покрытий

Этот метод применяется в конструкциях, когда один из электродов с острой кромкой прилегает к поверхности твёрдой изоляции.

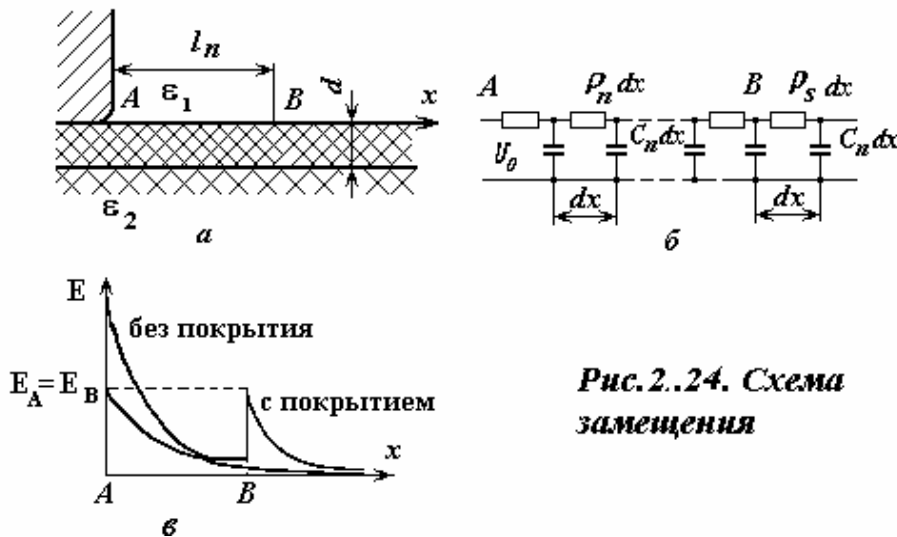


Рис.2.24. Схема замещения

Скругление края кромки (рис.2.24) приводит к появлению “щели” между электродом и поверхностью твёрдого диэлектрика. Рост напряжённости поля на крае электрода обуславливает возможность развития ЧР, что нежелательно. Для снижения напряжённости поля на участке АВ наносится полупроводниковое покрытие с удельным поверхностным сопротивлением  $\rho_{\text{пов}}$ . За счет этого происходит перераспределение напряженности электрического поля либо в соответствии с диэлектрическими проницаемостями на переменном напряжении, либо проводимостями на постоянном напряжении.

При наличии полупроводникового покрытия значение  $E_{\max A} < E_{\max}$ .  
Можно записать:

$$\frac{E_{\max A}}{E_{\max B}} = \sqrt{\frac{\rho_S}{\rho_{нов}}}, \text{ где}$$

$$E_A = U_0 \sqrt{\frac{\omega \rho_{нов} \varepsilon_0 \varepsilon_r}{d}}, \text{ а} \quad E_B = U_0 \sqrt{\frac{\omega \rho_S \varepsilon_0 \varepsilon_r}{d}}$$

при  $\rho_{нов} < \rho_S$  напряженность поля уменьшается в  $\sqrt{\frac{\rho_S}{\rho_{нов}}}$  раз.

## 8. Регулирование электрического поля с помощью конденсаторных обкладок

кон-

Такой метод нашел широкое применение в проходных изоляторах (вводах), в концевых и соединительных муфтах и др. Конденсаторные обкладки как бы делят изоляционный остов (рис. 2.25) на ряд емкостей, соединенных последовательно, на которых образуется разность потенциалов и происходит перераспределение электрического поля.

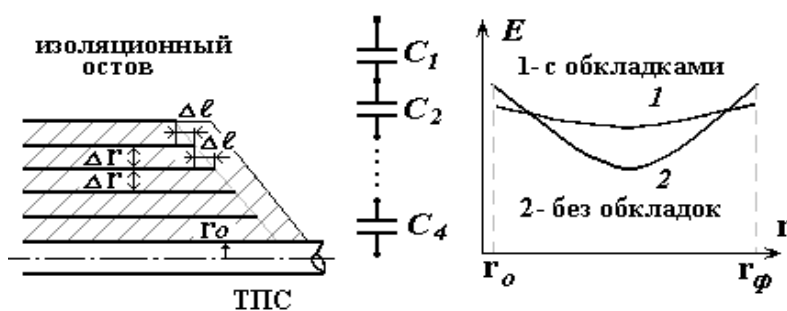


Рис.2.25

Изменяя длину и радиус обкладок, меняют емкость и добиваются в данном слое условия  $E \leq E_{дон}$ .

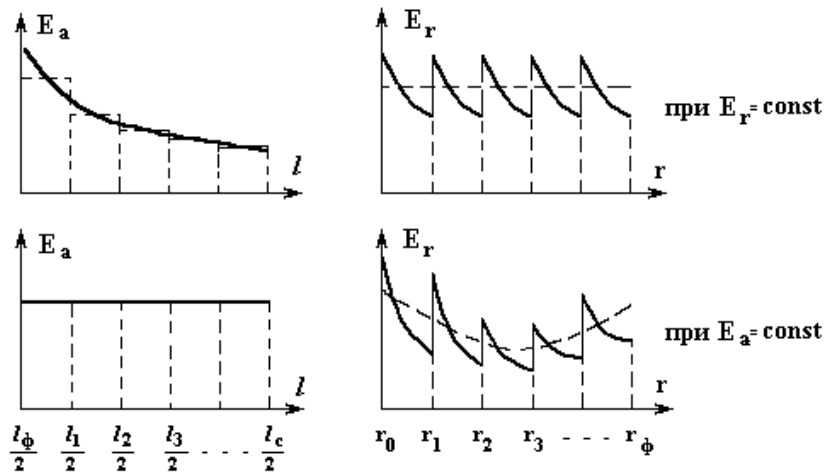
Выбор размеров и расположения обкладок производится из условия посто-

яинства аксиальной или радиальной напряженности поля.

Наиболее лучший эффект выравнивания поля имеет место при условии обеспечения постоянства радиальной напряженности  $E_r = const$ , что видно из рис. 2.26.

Для решения данной задачи сделаем следующие допущения:

1. Все конденсаторные обкладки сдвинуты в одну сторону.
2. Пренебрегаем рассеиванием электрического потока.
3.  $2\pi r \ell \varepsilon_0 \varepsilon_r E_r = const$ , т.е.  $E_r r \ell = const$ .
4. Количество обкладок велико, т.е.  $n \rightarrow \infty$ .



**Рис. 2.26.** Распределение напряженностей электрического поля в аксиальном и радиальном направлениях

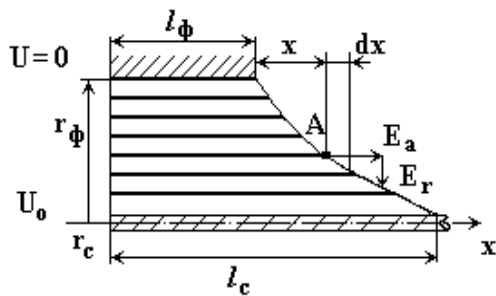


Рис2.27

Согласно рис.2.27 следует:

$$dU = E_a dx = -E_r dr. \quad (2.86)$$

Здесь  $dx$  и  $dr$  - приращения  $x$  и  $r$ .

$$DS = 2\pi r x \epsilon_0 \epsilon_r E_r = const \quad (2.87)$$

Согласно (2.87) можно записать

$$E_r r x = const. \quad (2.88)$$

**Первый вариант**

Электрическое поле в радиальном направлении постоянно, т.е.

$$E_r = const.$$

Отсюда  $rx = C_1 = const.$  (2.89)

Из (2.86) следует  $E_a = -E_r \frac{dr}{dx}.$  (2.90)

Из (2.87)  $\frac{dr}{dx} = -\frac{C_1}{x^2},$  (2.91)

тогда  $E_a = +E_r \frac{C_1}{x^2}.$  (2.92)

Подставляя в (2.86) получаем

$$dU = +E_r \frac{C_1}{x^2} dx. \quad (2.93)$$

Интегрируя левую и правую части уравнения, получаем

$$U = +E_r \frac{C_1}{x} + C_2. \quad (2.94)$$

Составим граничные условия:

при  $x = l_\phi \rightarrow U = 0$ , а при  $x = l_c \rightarrow U = U_0$ .

Подставляя в (2.94), получаем:

$$U = 0 + \frac{C_1 E_r}{l_\phi} + C_2, \quad (2.95)$$

$$U = U_0 + \frac{C_1 E_r}{l_c} = C_2.$$

Решая данную систему уравнений, находим:

$$C_1 E_r = \frac{U_0}{\left( \frac{1}{l_\phi} - \frac{1}{l_c} \right)}. \quad (2.96)$$

После подстановки в (2.92) найдем

$$E_a = \frac{U_0 l_c l_\phi}{x^2 (l_c - l_\phi)}. \quad (2.97)$$

Согласно полученному уравнению можно оценить изменение аксиальной напряженности поля от величин  $l_c$  и  $l_\phi$ .

### **Второй вариант**

Электрическое поле в аксиальном направлении постоянно, т.е.

$$E_a = const.$$

Из уравнения (2.86) следует

$$E_r = -E_a \frac{dx}{dr}. \quad (2.98)$$

Согласно (2.88)

$$rx \frac{dx}{dr} = C_1 = const.$$

Разделив переменные и проинтегрировав, получим:

$$\frac{x^2}{2} = C_1 \ln r + C_2. \quad (2.99)$$

Рассмотрим граничные условия:

При  $x = l_\phi \rightarrow r = r_\phi$ , а при  $x = l_c \rightarrow r = r_c$ , тогда

$$\frac{\ell_{\phi}^2}{2} = C_1 \ln r_{\phi} + C_2; \quad (2.100)$$

$$\frac{\ell_c^2}{2} = C_1 \ln r_c + C_2.$$

Отсюда найдем:

$$C_1 = \frac{\ell_c^2 - \ell_{\phi}^2}{2 \ln \frac{r_{\phi}}{r_c}}; \quad (2.101)$$

$$C_2 = \frac{\ell_{\phi}^2}{2} + \frac{\ell_c^2 - \ell_{\phi}^2}{2 \ln \frac{r_{\phi}}{r_c}} \cdot \ln r_{\phi}. \quad (2.102)$$

Подставляя (2.101), (2.102) в (2.100), находим:

$$\frac{x - \ell_{\phi}}{\ell_c^2 - \ell_{\phi}^2} = \frac{\ln \frac{r_{\phi}}{r}}{\ln \frac{r_{\phi}}{r_c}}. \quad (2.103)$$

Данное уравнение является уравнением огибающей обкладок.

Используя уравнения (2.86), (2.101), (2.103), получаем:

$$E_r = E_a \frac{\ell_c^2 - \ell_{\phi}^2}{\ln \frac{r_{\phi}}{r_c}} \cdot \frac{1}{r_x}. \quad (2.104)$$

Из условия постоянства  $E_a = \text{const}$ , можно принять:

$$E_a = \frac{U_0}{\ell_c - \ell_{\phi}}, \text{ тогда}$$

$$E_r = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{\ell_c + \ell_{\phi}}{\ln \frac{r_{\phi}}{r_c}} \cdot \frac{1}{rx}. \quad (2.105)$$

Полученное уравнение описывает изменение радиальной напряженности  $E_r$  от величин  $r$  и  $x$ .

Исходя из рассмотренного, возникает вопрос, как обеспечить условие  $E_r = E_{r_{\min}}$ , т.е.  $E_{r_c} = E_{r_{\phi}} = E_r$ .

Из (2.105) следует:

$$E_{r_{\max}} = \frac{U_0}{2r_{\phi}\ell_{\phi}} \frac{\ell_c + \ell_{\phi}}{\ln \frac{r_{\phi}}{r_c}} = \frac{U_0}{2r_c\ell_c} \frac{\ell_c + \ell_{\phi}}{\ln \frac{r_{\phi}}{r_c}}. \quad (2.106)$$

$$\text{Отсюда } \frac{r_{\phi}}{r_c} = \frac{\ell_c}{\ell_{\phi}} = z, \quad (2.107)$$



тогда

$$E_{r_{max}} = \frac{U_0 (1+z)}{2r_c z \ln z} = \frac{U_0 (1+z)}{2r_\phi z \ln z} . \quad (2.108)$$

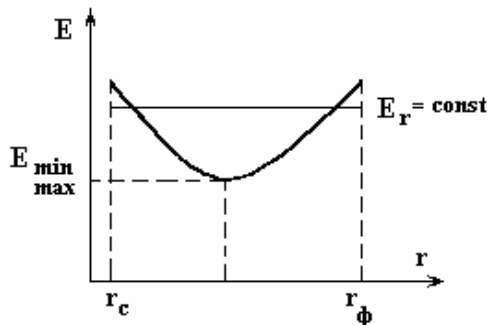


Рис.2.28

Минимальное значение этой величины будет иметь место при условии (см. рис.2.28),

$$\text{когда } \frac{dE_{r_{max}}}{dz} = 0 ,$$

т.е. при  $z = 3.6$ .

Если исходить из условия обеспечения минимума объема (затрат материала), т.е. когда  $\frac{dV}{dz} = 0$ , где  $V = \pi(r_\phi^2 - r_c^2)l_c$ , то  $z = 4.1$ .

На практике в расчетах принимают  $z = (3.6 - 5.0)$ .

Использование конденсаторных обкладок требует выполнения двух условий, когда радиальная и аксиальная напряженности поля не превышают значение допустимой напряженности поля  $E_{r_{дон}}$ , а с другой стороны, когда они при рабочем напряжении не превышают напряженность поля развития коронных или скользящих разрядов, т.е. когда  $E_r \leq E_{ск.раз}$  или когда  $E_{r.раб} \leq E_{кор}$ .

Второе условие вызвано тем, что края обкладок имеют острые кромки, где возникает высокая локальная напряженность поля, которая может вызвать ионизацию с последующим развитием разряда.

Для повышения напряжения появления ионизации применяют следующие меры:

1. Применение дополнительных обкладок, которые дополнительно приводят к выравниванию поля.

$$\text{В этом случае } U_{ск} = U_{ск1} n^{1-\beta} , \quad (2.109)$$

где  $U_{ск1}$  - напряжения развития разряда без дополнительных обкладок;

$n$  - количество дополнительных обкладок;

$\beta$  - коэффициент, равный  $(0,4 \div 0,5)$ .

## 2. Заворачивание края обкладок в виде манжет.

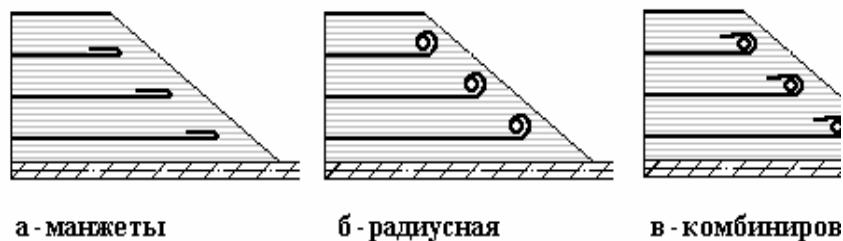


Рис.2.29

Заворачивание края обкладок в виде манжет (рис.2.29, а), как и использование дополнительных обкладок позволяет увеличить напряжение развития разрядов примерно в 1,5-2 раза.

### 3. Радиусная защита.

В этом случае края обкладок заворачиваются в виде трубки с определенным радиусом (рис.2.29, б). Такой метод позволяет увеличить напряжение развития разрядов в 2-2,5 раза.

### 4. Комбинированный (лепестковый) метод.

В этом случае края обкладок заворачиваются в виде лепестка (рис.2.29, в). Это позволяет увеличить напряжение развития разряда в 2-3 раза.

## 2.3. Периодические несинусоидальные токи в электрических цепях

Причинами являются:

1. Когда сам источник ЭДС или тока создаёт несинусоидальную ЭДС.
2. Когда в цепи содержится нелинейный элемент, у которого характеристика (сопротивление, индуктивность, ёмкость) зависит от величины тока или напряжения.
3. Когда имеет место сочетание обоих факторов (нелинейной ЭДС и наличие в электрической цепи нелинейных элементов).
4. Когда источник ЭДС создаёт постоянную или синусоидальную ЭДС, а один из элементов электрической цепи периодически изменяется во времени.

Если функция изменения ЭДС или тока сохраняет свойства периодической (повторяющейся) функции, то её можно разложить на отдельные составляющие в ряд Фурье, который записывается:

$$f(x) = A_0 + A_1 \sin(x) + A_2 \sin(2x) + A_3 \sin(3x) + \dots + B_1 \cos(x) + B_2 \cos(2x) + B_3 \cos(3x) + \dots \quad (2.110)$$

здесь  $A_0$  - амплитуда постоянной составляющей;

$A_1$  - амплитуда синусной составляющей первой гармоники;

$A_2$  - амплитуда синусной составляющей второй гармоники;

$B_1$  - амплитуда косинусной составляющей первой гармоники;

и т.д.

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad ; \quad (2.111)$$

$$A_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(x) dx \quad ; \quad (2.112)$$

$$B_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(x) dx \quad ; \quad \text{или} \quad (2.113)$$

$$\begin{cases} A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx \\ B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx \end{cases} \quad (2.114)$$

при этом:

$$A_k \sin(kx) + B_k \cos(kx) = A_k' (\sin(kx) + \psi_k) \quad , \quad (2.115)$$

$$\text{где } A_k^* = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad ; \quad \text{tg } \psi_k = \frac{B_k}{A_k} \quad .$$

Исходя из этого, ряд Фурье можем записать:

$$f(x) = A_0 + A_1 \sin(x + \psi_1) + A_2 \sin(2x + \psi_2) + \dots + A_n \sin(kx + \psi_k) \quad ; \quad (2.116)$$

$$f(x) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(kx + \psi_k) \quad . \quad (2.117)$$

### 2.3.1. Свойства периодических кривых, обладающих симметрией

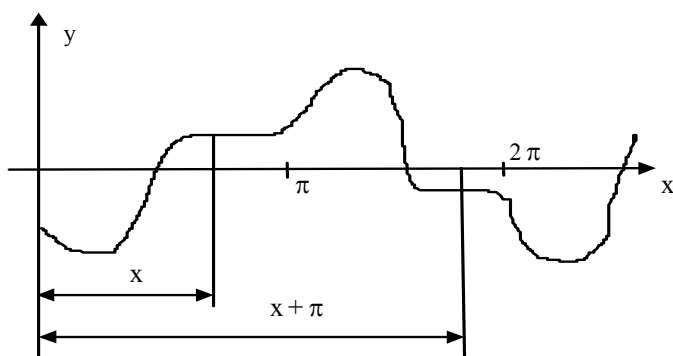


Рис.2.30

Данная кривая удовлетворяет условию  $-f(x + \pi) = f(x)$ , т.к. симметрична относительно оси абсцисс  $-x$ , т.е. если кривую сместить по оси  $x$  на полпериода и зеркально отразить относительно  $x$ , то полученная кривая совпадёт с кривой  $f(x)$ .

При разложении таких кривых в ряд Фурье отсутствует постоянная составляющая и чётные гармоники, т.е. равны нулю  $A_0 = A_2 = B_2 = A_4 = B_4 = 0$ .

Поэтому кривые данного типа раскладываются в ряд.

$$f(x) = A_1 \sin(x) + \dots + B_1 \cos(x) + A_3 \sin(3x) + B_3 \cos(3x) + \dots \quad (2.118)$$

Каждое слагаемое данного ряда удовлетворяет условию:

$$-f(x + \pi) = f(x), \quad \text{т.е.} \quad -\sin(x + \pi) = \sin(x).$$

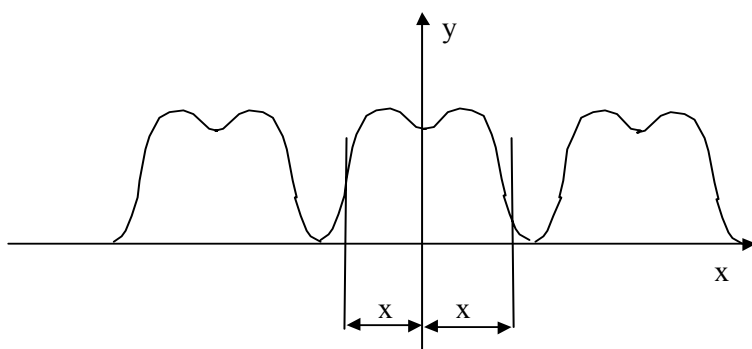


Рис.2.31

Кривая подобного типа обладает симметрией относительно оси ординат и удовлетворяет условию  $f(-x) = f(x)$ , т.е. кривую, лежащую левее оси ординат, можно зеркально отобразить на кривую, лежащую правее оси ординат.

При разложении в ряд таких кривых отсутствуют синусные составляющие  $A$ , т.е.  $A_1 = A_2 = A_3 = \dots = 0$ .

$$\text{Тогда } f(x) = A_0 + B_1 \cos(x) + B_2 \cos(2x) + B_3 \cos(3x) + \dots \quad (2.119)$$

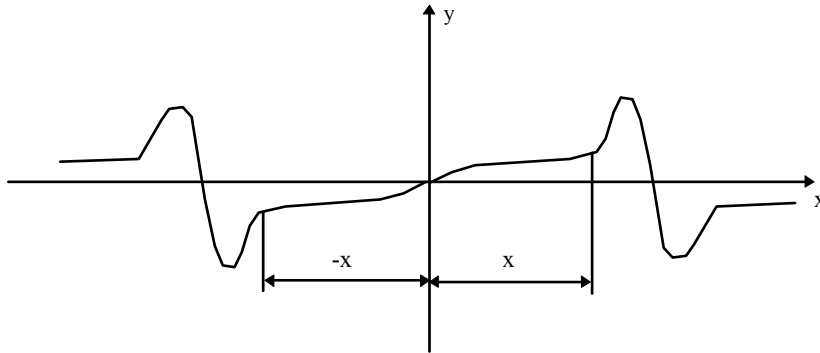


Рис.2.32

Кривые данного типа удовлетворяют условию  $-f(-x) = f(x)$ , т.е. симметричны относительно начала координат.

Разложение их в ряд Фурье имеет вид:

$$f(x) = A_1 \sin(x) + A_2 \sin(2x) + A_3 \sin(3x) + \dots \quad (2.120)$$

### 2.3.2. Графоаналитический метод определения гармоник ряда Фурье

Графоаналитический метод основан на замене определённого интеграла суммой конечного числа слагаемых. С этой целью период функции  $f(x)$ , равный  $2\pi$  разбивают на  $n$  равных частей  $\Delta x$ .

$$\Delta x = \frac{2\pi}{n},$$

тогда

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \cong \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \left( \frac{2\pi}{n} \right) = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \left( \frac{2\pi}{n} \right) \quad (2.121)$$

$$\text{или } A_0 = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x), \quad (2.122)$$

где  $f_p(x)$  - значение функции в середине интервала  $\Delta x$ .

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx \cong 2 \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \left( \frac{2\pi}{n} \right) \sin_p(kx) \quad (2.123)$$

или

$$A_k = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x) \sin_p(kx). \quad (2.124)$$

Амплитуда косинусной составляющей:

$$B_k = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p(kx). \quad (2.125)$$

Здесь  $\sin_p(kx)$  и  $\cos_p(kx)$  - соответственно значения функций  $\sin(kx)$  и  $\cos(kx)$  при  $x = (p - 0,5) \Delta x$ , т.е. в середине интервала.

Перед графическим разложением функции необходимо сначала выяснить, не обладает ли функция какой-либо симметрией. Это позволит исключить сразу из рассмотрения те или иные гармонические составляющие.

В нашем случае кривая симметрична относительно оси  $x$ , поэтому  $A_0 = 0$ , кроме того, равны нулю и чётные гармоники  $A_2 = A_4 = B_2 = B_4 = 0$ .

Обычно ряд Фурье быстро сходится и можно ограничиться рассмотрением первых трёх или пяти гармоник.

Разбиваем нашу кривую на 24 части, тогда с учетом ее симметрии

$$p = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12$$

$$f_p(x) = 7; 11; 13,5; 15,4; 17,4; 20,5; 25,4; 32,5; 27,7; 19,2; 10; 5.$$

**Решение:**

$$A_0 = 0$$

$$A_1 = \frac{2}{\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \sin_p(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(x) \sin(x) = \frac{4}{24} \left[ 7 \sin\left(\frac{15^\circ}{2}\right) + 11 \sin\left(15^\circ + \frac{15^\circ}{2}\right) + \dots \right] \approx 25,3;$$

$$B_1 = \frac{2}{\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(x) \cos(x) = \frac{4}{24} \left[ 7 \cos\left(\frac{15^\circ}{2}\right) + 11 \cos\left(15^\circ + \frac{15^\circ}{2}\right) + \dots \right] \approx -5,23.$$

Соответственно находим:

$$A_3 = \frac{4}{24} \left[ 7 \sin 3\left(\frac{15^\circ}{2}\right) + \dots \right] \approx 3,47 \quad B_3 = \frac{4}{24} \left[ 7 \cos 3\left(\frac{15^\circ}{2}\right) + \dots \right] \approx 5,1.$$

Амплитуды гармоник равны:

$$A_1^* = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} = \sqrt{25,3^2 + (-5,23)^2} = 29,5;$$

$$A_3^* = \sqrt{A_3^2 + B_3^2} = \sqrt{3,47^2 + 5,1^2} = 6.$$

Тангенс угла смещения гармоник относительно начала координат:

$$\operatorname{tg}(x_1) = \frac{B_1}{A_1} = \frac{-5,23}{25,3} = -0,206 ; \quad \psi_1 = -11^\circ 40' ;$$

$$\operatorname{tg}(x_3) = \frac{B_3}{A_3} = \frac{5,1}{3,47} = 1,47 ; \quad \psi_3 = 55^\circ 50' .$$

Если ограничиться третьей гармоникой, то:

$$f(\omega t) = 25,9 \sin(\omega t - 11^\circ 40') + 6 \sin(3\omega t + 55^\circ 50') . \quad (2.126)$$

В качестве другого примера рассмотрим функцию напряжения в виде треугольных (пилообразных) импульсов (рис.2.33).

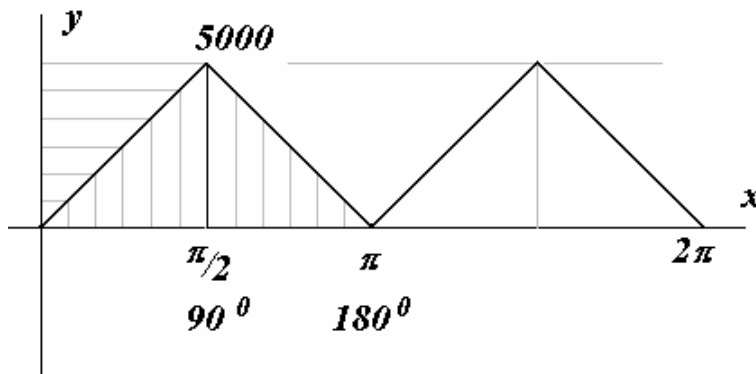


Рис.2.33

Данная функция пилообразного напряжения симметрична относительно оси ординат, поэтому при разложении функции в ряд будут отсутствовать синусные составляющие, т.е.

$$f(x) = A_0 + B_1 \cos(x) + B_2 \cos(2x) + B_3 \cos(3x) + \dots \quad (2.127)$$

Из метода подобия треугольников найдём:

<b><i>p</i></b>	1	2	3	4	5	6	7
<b><i>x</i></b>	7,5	22,5	37,5	52,5	67,5	82,5	97,5
<b><i>f<sub>p</sub>(x)</i></b>	$\frac{U_x \cdot 7,5}{90}$	$\frac{U_x \cdot 22,5}{90}$	$\frac{U_x \cdot 37,5}{90}$	$\frac{U_x \cdot 52,5}{90}$	$\frac{U_x \cdot 67,5}{90}$	$\frac{U_x \cdot 82,5}{90}$	$2U_x - \frac{U_x \cdot 7,5}{90}$

Тогда:

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x) = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(x) ;$$

$$B_k = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cdot \cos(xk) ;$$

$$\operatorname{tg} \psi_k = \frac{B_k}{A_k} = \frac{B_k}{0} ; \quad \psi_k = 45^\circ$$

## Глава 3. Основы моделирования ЭИК

### 3.1. Условия работы электрической изоляции ЭИК и требования, предъявляемые к ней

#### 3.1.1. Классификация электрической изоляции ЭИК

Применяемая электрическая изоляция (ЭИ) в ЭИК может быть классифицирована:

##### *По виду диэлектрика:*

1. Газовая изоляция;
2. Жидкая, масло – барьерная изоляция;
3. Твердая (органическая, неорганическая) изоляция;
4. Комбинированная изоляция.

##### *По роду работы:*

1. Внешняя изоляция – работа в условиях внешней среды;
2. Внутренняя изоляция – защищена от воздействия внешней среды и атмосферных перенапряжений.

##### *По виду воздействующего напряжения:*

1. Главная изоляция – между отдельными фазами;
2. Продольная изоляция – межвитковая и др.

#### 3.1.2. Условия работы и факторы, воздействующие на изоляцию

В процессе работы на электрическую изоляцию ЭИК воздействуют:

1. Электрическое (рабочее) напряжение, перенапряжения;
2. Колебания температуры окружающей среды;
3. Механические нагрузки;
4. Загрязнения, влага, агрессивные среды, радиация и др.

##### *1. Воздействующие электрические нагрузки делятся:*

1. Постоянные - рабочее напряжение;
2. Переменные - колебания напряжения за счет коммутационных перенапряжений в сети;
3. Случайные - атмосферные (грозовые) перенапряжения.

*Рабочее напряжение* воздействует на электрическую изоляцию ЭИК в течение всего периода эксплуатации. Величина этого напряжения устанавливается в соответствии с ГОСТ 1516-76 номинальным напряжением  $U_n$ , которое указывает класс напряжения конструкции:

-3, 6, 10, 20, 35, 110, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ при частоте 50 Гц



## Высокие Сверхвысокие Ультравысокие

и 1500 кВ для линий постоянного тока.

Величина рабочего напряжения зависит от режима работы линии электропередачи и может отличаться от номинального напряжения в большую или меньшую сторону. Для трехфазных сетей с изолированной нейтралью рабочее напряжение рассчитывается как линейное:

Для $U_n = 3,6,10,20$ кВ	$U_p = U_n + 0,2U_n$
$U_n = 35,110,150,220$ кВ	$U_p = U_n + 0,15U_n$
$U_n = 330$ кВ	$U_p = U_n + 0,1U_n$
$U_n = 500,750$ кВ	$U_p = U_n + 0,05U_n$
$U_n = 1150$ кВ	$U_p = U_n + 50$ кВ

В сетях с глухо-заземленной нейтралью рабочее напряжение рассчитывается на фазное напряжение, т.е.  $U_\phi = U_l / \sqrt{3}$ .

**Внутренние - коммутационные перенапряжения**, воздействующие на изоляцию ЭИК, возникают в линии электропередачи в результате изменения режима ее работы. Условно можно выделить три группы коммутационных перенапряжений.

*К первой группе* относятся коммутационные перенапряжения, которые возникают в линии электропередачи при однофазных замыканиях на землю или внезапных сбросах нагрузки. Величина этих перенапряжений не должна превышать  $1,38 U_\phi$  в сетях с заземленной нейтралью и  $1,73 U_\phi$  в сетях с изолированной нейтралью.

*Ко второй группе* относятся перенапряжения, возникающие при отключении ненагруженных линий, а также при различных резонансных явлениях. Величина амплитуды этих перенапряжений может достигать  $3 U_\phi$  с длительностью  $0.3 \div 3$  мс с частотой от 200 Гц до 10 кГц.

*К третьей группе* относятся перенапряжения, возникающие при отключении ненагруженных трансформаторов (затухающие колебания). Величина их амплитуды может достигать  $(3.5 \div 4.0) U_\phi$  при длительности до 100 мкс.

**Внешние – атмосферные (грозовые) перенапряжения** возникают на изоляции ЭИК как при прямых ударах молнии, так и при разряде молнии вблизи ЛЭП. Величина амплитуды атмосферных перенапряжений может быть определена

$$U_{пер.гроз.} = I_m Z_\phi, \quad (3.1)$$

где:  $I_m$  - ток в канале молнии (порядка 10 кА);

$Z_\phi$  - эквивалентное волновое сопротивление (70÷120) Ом.

Амплитуда атмосферных перенапряжений ограничивается вентильным разрядником и зависит от его вольтсекундной характеристики и величины

напряжения, остающегося на рабочем сопротивлении разрядника при протекании через него тока молнии и обычно составляет  $(1.2 \div 1.4) U_{\phi}$ .

Число грозовых разрядов, т.е. число ударов молний зависит от района и приблизительно может быть найдено:

$$N = n_r n_s [S + 3h_{cp} (\Pi + 10h_{cp})], \quad (3.2)$$

где:  $n_r$  - число грозовых часов за год;

$n_s$  - среднее число ударов в течение 1-го грозового часа на площади  $S=1\text{км}^2$ , ( $n_s=0,1$ );

$h_{cp}$  - средняя высота объекта;

$S$  - площадь объекта;

$\Pi$  - периметр объекта.

Длительность импульса атмосферных перенапряжений колеблется в пределах  $(20 \div 80)$  мкс. Поэтому на практике для испытаний используют стандартный импульс с параметрами  $\tau_{\phi} = 1,2$  мкс и  $\tau_{и} = 50$  мкс, показанный на рис. 3.1.



Рис.3.1. Стандартный импульс ( $\tau_{\phi} = 1,2$  мкс,  $\tau_{и} = 50$  мкс)

Характер протекания коммутационных и атмосферных перенапряжений показан на рис. 3.2.

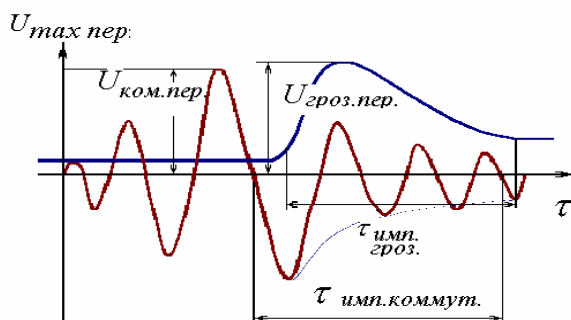


Рис. 3.2. Осциллограмма грозовых импульсов и коммутационных перенапряжений в ЛЭП

Как коммутационные, так и атмосферные перенапряжения являются случайными явлениями, поэтому носят статистический характер. Распреде-

ление грозových перенапряжений обычно подчиняется нормальному закону распределения:

$$F(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_U^{\infty} e^{-\frac{(U - \bar{U})^2}{2\sigma^2}} dU \quad (3.3)$$

## 2. Температурные условия работы ЭИ

В процессе эксплуатации электрическая изоляция ЭИК подвергается воздействию тепла, выделяемого в ЭИК за счет диэлектрических потерь в изоляции и за счет омических потерь в проводниках при протекании в них длительного номинального тока. При протекании в проводниках токов короткого замыкания в аварийном режиме изоляция также дополнительно подвергается кратковременному перегреву. В зависимости от типа и формы конструкции, температуры окружающей среды могут изменяться условия теплоотвода за счет конвективного теплообмена, что будет определять максимальную температуру внутри ЭИК и, тем самым, ее долговечность.

Температура окружающей среды и ее колебания в процессе эксплуатации зависят от климатической зоны и категории помещений, в которых работает ЭИК.

В соответствии с *ГОСТ 15150-69* все климатические районы делятся на 10 групп (классов), что показано в таблице 3.1.

Каждому из этих климатических исполнений по *ГОСТ 15130-69* предусматриваются верхний и нижний пределы рабочей температуры (таблица 3.2), а также *категория исполнения помещений* (таблица 3.3).

Таблица 3.1

<i>Климатическое исполнение изделий согласно ГОСТ 15150-69.</i>	<i>Обозначение.</i>	<i>Класс</i>
- Районы с умеренным климатом	У	0
- С умеренным и холодным климатом	УКЛ	1
- С тропическим и влажным климатом	ТВ	2
- С тропическим сухим климатом	ТС	3
- С тропическим сухим и влажным	Т	4
- Общеклиматич. условия на суше	О	5
- С умеренным холодным морским	М	6
- С тропическим морским	ТМ	7
- Общеклиматическим морским	ОМ	8
- Для всех районов на суше и на море	В	9

Таблица 3.2

Категория исполнения	Категория размещения	$t_0, ^\circ\text{C}$				
		Рабочая			Предельная рабочая	
		Верхний	средний	нижний	Верхний	нижний
0	1.2	+45	+27	-60	+55	-60
	4	+45	+27	+1	+55	+1
	5	+35	+10	-10	+35	-10

Таблица 3.3

<i>Категория исполнения помещений</i>	<b>Обозначение</b>
- эксплуатация изделий на открытом воздухе.	1
- помещения, где колебания температуры и влажности не отличаются от открытых (под навесом)	2
- закрытые помещения без искусственного регулирования температуры и влажности.	3
- закрытые помещения с искусственным регулированием климата.	4
- помещения с повышенной влажностью (искусственное регулирование влажности)	5

### 3. Воздействие механических нагрузок

По характеру воздействия различают статические, переменные и случайные механические нагрузки. К таким механическим нагрузкам относятся скоростной напор ветра, электродинамические усилия между проводниками, внутренние механические напряжения, усилия сжатия и изгиба в процессе работы.

*Скоростной напор ветра* с силой  $F_v$

$$F_v = K \cdot S \cdot \gamma_v \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (3.4)$$

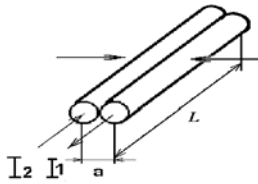
где:  $K$  - коэффициент сопротивления потоку ветра,

$S$  - площадь поверхности,

$\gamma_v$  - плотность воздуха,

$v$  - скорость ветра.

**Усилия от 2-х рядом расположенных проводников**  
(электродинамические силы притяжения).



$$F_{из} = K \cdot I_1 \cdot I_2 \frac{\sqrt{\ell^2 + a^2} - a}{a} \quad (3.5)$$

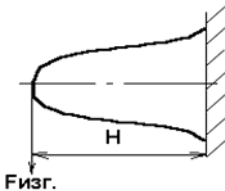
**Напряжения при всестороннем сжатии (в воде)**

$$\sigma_{сж} = 10 \cdot H \cdot \gamma_{ж}, \quad (3.6)$$

где:  $H$  - глубина погружения.

$\gamma_{ж}$  - плотность жидкости.

**Изгибающие нагрузки**

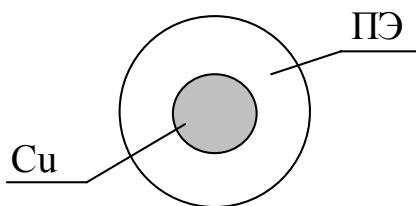


$$\sigma_{из} = \frac{M_{из}}{W} = \frac{F_{из} \cdot H}{W} \quad (3.7)$$

Здесь:  $W$  - момент сопротивления изгибу;

$M_{из}$  - изгибающий момент.

**Внутренние механические напряжения**, возникающие при усадке в процессе охлаждения. Примером могут служить внутренние механические напряжения при наложении полиэтиленовой изоляции (ПЭ) на медный провод.



$$\sigma_{вн} = \frac{G_1 \cdot G_2 (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta t}{G_1 + G_2 - (\alpha_1 G_1 + \alpha_2 G_2)}, \quad (3.8)$$

где:  $G_1, G_2$  - модуль упругости материала;

$\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты линейного расширения;

$\Delta t$  - изменение температуры.

**4. Воздействие атмосферных факторов**

В процессе работы ЭИК подвергаются влиянию различных атмосферных факторов. Это воздействие дождя, снега, тумана, росы, гололеда, различных природных и промышленных загрязнений. Действие этих факторов, как правило, вызывает резкое снижение разрядных напряжений наружной изоляции ЭИК за счет перераспределения напряжений по поверхности изоляторов, что облегчает развитие поверхностного разряда.

Все районы по степени загрязнённости подразделяются на 6 категорий:

Таблица 3.4

Степень загрязнённости	$\lambda_{э}, \text{см./кВ};$ $U_n = 35 \text{ кВ}$	$\lambda_{э}, \text{см./кВ};$ $U_n = 110-750 \text{ кВ}$
I - степь, лесостепь	1,3- 1,7	1,5
II- земледельческие районы вдали от промышленных предприятий.	1,7	1,5
III,IV,V,VI. - промышленные районы (в зависимости от расстояния от объекта)	2,25	1,8
	2,6	2,25
	3,5	3,0
	4,0	3,5

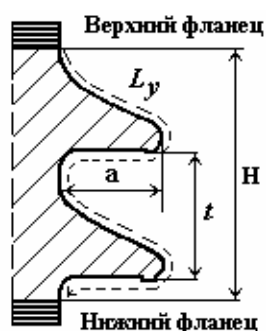


Рис.3.3

Здесь  $\lambda_{э}$  – удельная эквивалентная длина пути тока утечки, определяемая из уравнения:

$$\lambda_{э} = L_{э} / U_{\text{раб.лин.}}$$

$$L_{э} = L_y / K,$$

где:  $L_y$  - длина пути тока утечки;

$K$  - коэффициент формы изолятора.

Значение коэффициента формы изолятора зависит от отношения  $L_y/H$ .

Таблица 3.5

$L_y/H$	1.5-2	2-2.3	2.3-2.7	2.7-3.2	3.2-3.5
$K$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4

Для районов IV- VI степени загрязнённости внешнюю изоляцию делают усиленной с большим коэффициентом -  $K$ , т.е. увеличивают  $L_y$  за счёт дополнительных рёбер и их вылет. Нормируемые значения  $L_y$  приведены в таблицах 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6

Категория электрооборудования.	$L_y/U_{\text{р.лин.}}, \text{м/кВ}$	
	С заземленной нейтралью	С изолированной нейтралью
A (нормальная)	0.015	0.017
Б (усиленная)	0.0225	0.026
В (усиленная)	0.031	0.035

Таблица 3.7

Класс напряжения, кВ	Наибольшее U раб, кВ	Длина пути тока утечки внешней изоляции, нормируемая ГОСТ 9920- 75		
		А	Б	В
3	3,6	0.06	0.09	0.125
6	7.2	0.12	0.18	0.25
10	12	0.20	0.30	0.42
15	17.5	0.3	0.45	0.62
20	24.0	0.4	0.62	0.84
35	40.5	0.7	1.05	1.40
110	126	1.9	2.8	3.9
150	172	2.6	3.9	7.9
220	252	3.8	5.7	85.35
330	363	5.4	8.0	11.20
500	525	8.0	11.8	-
750	787	11.8	-	-

Кроме перечисленных факторов электрическая изоляция ЭИК в процессе эксплуатации может подвергаться воздействию различных агрессивных газов и жидкостей, радиации и др. Все перечисленные факторы могут действовать в различной комбинации, вызывая снижение механических, электрических и тепловых характеристик изоляции и, тем самым, уменьшение надежности ЭИК.

### ***3.1.3. Требования, предъявляемые к ЭИК***

Для обеспечения высокой надежности и экономичности ЭИК при их проектировании необходимо предусмотреть:

1. Надежное изолирование проводников;
2. Надежную механическую связь между проводниками;
3. Высокую механическую и электрическую прочность, теплостойкость, морозостойкость и влагостойкость;
4. Простоту технологии изготовления;
5. Относительно малые расходы на производство;
6. Простоту ремонта и замены;
7. Безопасность обслуживания;
8. Экологическую безопасность при производстве и эксплуатации;
9. Обеспечение заданного срока службы.

Выполнение всех этих требований достаточно сложная задача и во многих случаях требует принятия компромиссных решений. Сложности в обеспечении высокой надежности электрической изоляции обусловлены:

1. Отсутствием электроизоляционных материалов, которые одновременно обладают высокой электрической и механической прочностью, высокими диэлектрическими свойствами, теплостойкостью и др.;
2. Рост габаритов конструкции при создании изоляции на высокие и сверхвысокие напряжения обгоняет рост рабочих напряжений;
3. Отставанием теории диэлектриков от запросов практики, что обуславливает отсутствие методики надежных расчетов.

Решение указанных вопросов непосредственно связано с вопросами координации изоляции, т.е. согласованием характеристик защитной аппаратуры со свойствами изоляции. Работы по координации изоляции закреплены ГОСТ 1516-76, который нормирует испытательные напряжения в сухом состоянии, под дождем, напряжение грозových импульсов и напряжение коммутационных импульсов в соответствии с величиной номинального напряжения (таблица 3.8).

Таблица 3.8

Класс напряжения, U ном, кВ	U <sub>раб</sub> (1 мин.), кВ	Испытательное напряжение, кВ		
		U <sub>с</sub> , в сухом состоянии	U <sub>д</sub> , под дождём.	U имп.
3	3.6	27	20	44
6	7.2	36	26	60
10	12	47	34	80
15	17.5	63	45	105
20	24	75	55	125
35	40.5	110	85	195
110	126	295	215	480
150	172	375	290	660
220	252	550	425	950
330	363	700	550	1200
500	525	900	740	1600
750	784	1050	900	2100
1150	1200	1300	1300	2900

### 3.2. Технические условия и расчетное задание

Для проектирования ЭИК в качестве исходной информации необходимо иметь технические условия и расчетное задание.

- В технических условиях оговариваются:
  - а) назначение ЭИК;
  - б) степень загрязненности района;
  - в) климатические условия (класс исполнения);
  - г) диапазон рабочих температур (-40+40 °С);
  - д) вид перенапряжения и его уровень.



- В расчетном задании указываются основные технические характеристики ЭИК.
  - 1) номинальное напряжение;
  - 2) номинальный ток, допустимая плотность тока, емкость и др.;
  - 3) заданный срок службы или вероятность безотказной работы;
  - 4) действующие механические или иные нагрузки;
  - 5) амплитуда перенапряжения и среднее квадратичное отклонение.
- В расчётном задании могут дополнительно оговариваться тип материала диэлектрика, габаритные размеры и иные другие параметры, уточняющие условия проектирования.
  - Для ЭИК, работающих в цепях постоянного тока, необходимо знать амплитуду и частоту переменной составляющей, которая будет вызывать дополнительный нагрев изоляции и может привести к ионизационным процессам.
  - Для ЭИК, работающих в цепях переменного тока, необходимо знать амплитуду и частоту высших гармоник, которые наиболее выражены в кривой напряжения.
  - Для ЭИК, работающих на импульсном напряжении, необходимо знать форму импульсов, их полярность и частоту их следования.

Если в расчетном задании не указан тип диэлектрика, то расчёт нужно начинать с его выбора. Эта задача облегчается, если известно сочетание требований, о которых говорилось выше. Обычно для рассмотрения выбираются 2÷3 типа диэлектрика, из которых в процессе расчета выбирается наиболее оптимальный.

После выбора типа диэлектрика выбирается его толщина. При выборе толщины диэлектрика часто приходится идти компромиссным путем, т.к. увеличение толщины, с одной стороны, позволяет повысить рабочее напряжение, а, с другой стороны, увеличивает габариты конструкции и расход материалов.

При выборе толщины диэлектрика также необходимо ориентироваться на минимальные толщины соответствующих материалов, определяемые **ГОСТ**.

Поскольку величина рабочего (номинального) напряжения практически всегда оговаривается в задании, то определение толщины диэлектрика взаимосвязано с выбором рабочей напряжённости - ***E<sub>раб</sub>***.

$$d_{из} = \frac{U_{раб}}{E_{раб}} = \frac{U_{исп}}{E_{исп}}, \text{ где} \quad (3.9)$$

$$E_{раб} = \frac{E_{исп}}{k_2} = \frac{E_{нр}}{k_1 k_2} \quad (3.10)$$

Здесь:  $k_1 = 1 \div 2$  – коэффициент запаса прочности;

$k_2 = 1.2 \div 1.8$  – коэффициент, учитывающий разброс значений  $E_{np}$ ;

$k_n = 1 \div 2$  – коэффициент, учитывающий перенапряжения.

При выборе толщины диэлектрика и рабочей напряженности необходимо учитывать зависимость электрической прочности диэлектрика от его вида и толщины (см. рис.3.4).

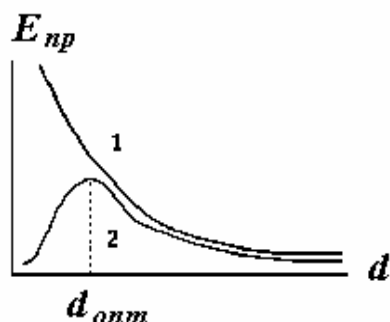


Рис.3.4. Зависимость электрической прочности диэлектрика от толщины

1 – неоднородный диэлектрик;

2 – слоистый диэлектрик

$$d_{опт} = nd_1, \quad (3.11)$$

где:  $d_1$  – толщина одного листа.

При выборе рабочей напряженности поля необходимо соблюдать условие отсутствия ионизации, т.е. выполнение условия  $E_{раб} < E_{н.и.}$ . Учитывая это, величина рабочей напряженности может быть найдена:

- для твердой изоляции при  $d = (0.03 \div 1.0)$  мм

$$E_{раб} \leq E_{np} = 3,6 \cdot d^{-0.5}, \quad [\text{МВ/м}] \quad (3.12)$$

- для конденсаторной бумаги

$$E_{раб} \leq E_{np} = 3,3 \cdot d^{-0.58}, \quad [\text{МВ/м}] \quad (3.13)$$

#### Глава 4. Моделирование и расчёт газовой изоляции

Газовая изоляция широко используется в качестве наружной изоляции воздушных ЛЭП, внутренней изоляции газонаполненных кабелей и конденсаторов, в герметизированных распределительных устройствах и др. высоковольтной аппаратуре.

К преимуществам газа относятся такие его свойства, как способность к самовосстановлению электрической прочности после пробоя, достаточно высокие диэлектрические свойства (малое значение  $tg\delta \cong 10^{-6}$ , низкая проводимость  $\gamma \cong 10^{-15}$  1/ом·м и др.).

Расчёт газовой изоляции сводится к выбору типа газа и определению его пробивного напряжения при заданной геометрии промежутка.

Величина пробивного напряжения газов -  $U_{np}$  зависит от модели реальной конструкции ЭИК, состава газа, его давления, температуры, влажности, формы и частоты приложенного напряжения, степени неоднородности электрического поля.

В таблице 4.1 приведены основные типы газов и их характеристики по отношению к воздуху.

Таблица 4.1

Газ	Воздух	N <sub>2</sub>	SF <sub>6</sub> (эле- газ)	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (фреон)	CO <sub>2</sub>	CCl <sub>4</sub>
$n=U_r/U_{воз}$	1.0	1.0	2.5	2.6	0.95	6.3
$T_{сж}, ^\circ\text{C}$	- 192	- 195.8	- 62	- 28	- 34.6	76

Из таблицы 4.1 видно, например, что при переходе к элегазу пробивное напряжение промежутка возрастает в 2,5 раза, т.е.

$$U_{пр.газа} = n \cdot U_{пр.воздуха} \quad (4.1)$$

При оценке пробивного напряжения газа необходимо учитывать статистический разброс его величины, который обусловлен изменением скорости подъёма напряжения, погрешностью измерительных приборов, колебаниями температуры, давления и т.д.

Функция распределения пробивных напряжений для газов подчиняется нормальному закону распределения и описывается уравнением:

$$P(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(U-\bar{U}_{пр})^2}{2\sigma^2}} \cdot dU, \quad (4.2)$$

где:  $\bar{U}_{пр}$  - математическое ожидание;

$$\bar{U}_{пр} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n U_{пр_i} \quad (4.3)$$

$\sigma$  - среднеквадратичное отклонение;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (U_{пр} - \bar{U}_{пр})^2}{N - 1}} \quad (4.4)$$

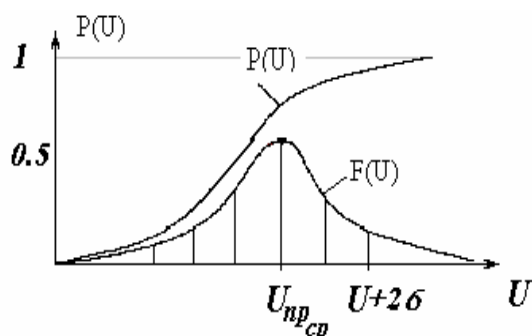


Рис.4.1. График функции распределения пробивных напряжений  $P(U)=f(U)$  и плотности вероятности пробова  $F(U)=f(U)$  для газов

Для оценки статистического разброса пробивных напряжений газов используется коэффициент вариации, который составляет

$$k = \frac{\sigma}{U_{np}} \cong 0.01 \div 0.02$$

Учет влияния температуры и давления газов в расчётах производится с помощью, так называемой относительной плотности воздуха, т.е.

$$U_{np} = U_{np.n} \cdot \delta, \quad (4.5)$$

где:  $\delta = \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T} = \frac{P(273 + 20)}{1.013 \cdot 10^5 (273 + t)} = 2.89 \cdot 10^{-5} \left(\frac{P}{T}\right),$

Здесь:  $U_{np.n}$  – пробивное напряжение в нормальных условиях при  $\delta = 1$ ;

$P$  – давление, [Па];

$T$  – температура, [К]

На рис.4.2 показана зависимость  $U_{np}$  газов от произведения  $P \cdot \delta$  для воздуха и водорода.

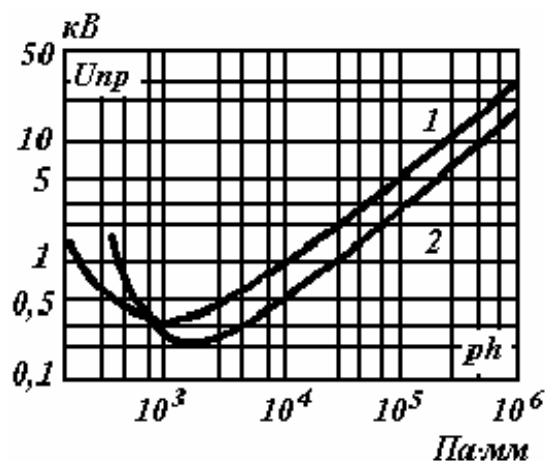


Рис.4.2. Зависимость пробивного напряжения воздуха и водорода от произведения давления на расстояние между электродами

1 – воздух;

2 – водород.

Для учета влияния влажности вводится поправочный коэффициент -  $m$ , который находится графически (см. рис. 2-9 [Л1]).

$$\bar{U}_{np} = \bar{U}_{np.n} \cdot \frac{\delta}{m + 1} \quad (4.6)$$

#### 4.1. Расчет пробивного напряжения воздуха в равномерном и слабонеровном электрическом поле

На практике для вычисления пробивного напряжения газа используются эмпирические формулы или имеющиеся в литературе графические зависимости  $U_{np} = f(l)$ .

- Для равномерного или слабонеровного поля в системе электродов «плоскость-плоскость»

$$\bar{U}_{np} = 2,38 \cdot \delta \cdot \ell + 2,48 \sqrt{\delta \cdot \ell} \quad [\text{кВ}], \quad \text{при } l \leq 160 \text{ мм.} \quad (4.7)$$

$$\bar{U}_{np} = 2,46 \cdot \delta \cdot \ell + 2,11 \sqrt{\delta \cdot \ell} \quad [\text{кВ}], \quad \text{при } l \leq 120 \text{ мм.} \quad (4.8)$$

- Для сферических электродов

$$\bar{U}_{np} = 1,36 + 3 \cdot \delta \cdot \ell \text{ [кВ]}, \text{ при } l / D < 1 \quad (4.9)$$

- В системе коаксиальных цилиндрических электродов

$$\bar{U}_{np} = 2,55 \cdot r \left( r + \frac{1,8}{\sqrt{r}} \right) \ln \frac{R}{r}, \text{ [кВ]} \quad (4.10)$$

- В системе электродов - “цилиндр-цилиндр” или “шар-шар”

$$E_{np} = 31\delta \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{r\delta}} \right) \text{ [кВ/см]}, \text{ при } R/r \leq 10 \quad (4.11)$$

или

$$\bar{U}_{np} = \frac{E_{np} \ell}{y} \quad \text{при } \ell > r \text{ [мм]}, \quad (4.12)$$

где  $E_{np}$  и  $y = f(l/r)$  определяются графически (рис.2.14 [Л1]).

#### 4.2. Расчет пробивного напряжения воздуха в резконеоднородном электрическом поле

К особенностям развития пробоя (разряда) газа в неравномерном поле относятся:

- Развитие короны в области наибольшей (локальной) напряженности поля;
- Проявление эффекта полярности острия при пробое;
- Уменьшение значения  $U_{np}$  по сравнению с  $U_{np}$  в равномерном поле;
- Более медленное возрастание  $U_{np}$  с увеличением давления по сравнению с равномерным полем (не выполняется закон Пашена).

Развитие короны является крайне нежелательным явлением, т.к. вызывает преждевременное разрушение изоляции и металлической арматуры, является источником радио и тепломех, приводит к дополнительным потерям энергии. Для определения пробивного напряжения газа в резконеоднородном поле в основном используются эмпирические формулы, учитывающие вид промежутка и его длину.

При больших расстояниях  $l = 300 \div 2000$  [мм] между электродами «острие-острие» и «острие-плоскость» зависимость  $U_{np} = f(l)$  может быть экстраполирована уравнением вида:

- На переменном напряжении частотой  $f = 50 \div 10^6$  Гц

$$U_{np} = 15 + 0,38\ell, \text{ [кВ]}; \text{ при } l = 300 \div 2000 \text{ [мм]}; \quad (4.13)$$

- На импульсном напряжении положительной полярности

$$U_{np} = 50 + 0,7\ell, \text{ [кВ]} \quad (4.14)$$

#### 4.3. Разряд на границе раздела двух сред

В отличие от обычного воздушного промежутка, разряд на границе раздела двух сред имеет свои особенности, обусловленные искажением поля на

этой границе. На практике встречаются 3 случая, которые можно представить рисунками (рис.4.3).

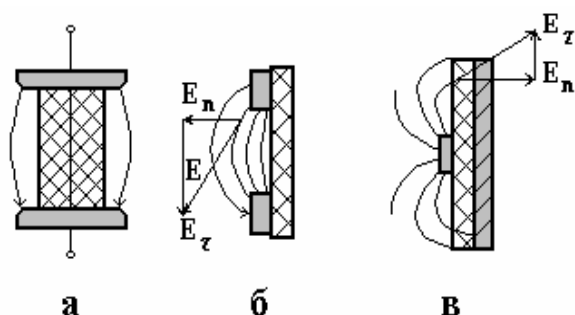


Рис. 4.3. Распределение поля на границе раздела двух сред  
 а) слабонервномерное поле;  
 б) резконервномерное поле с малой величиной  $E_n$  к границе раздела;  
 в) резконервномерное поле с большой величиной  $E_n$  к границе раздела

Наименьшее искажение поля имеет место только для случая (а). В случае (б) или (в), за счет искажения поля резко возрастает локальная напряженность поля, что может вызвать развитие коронного или поверхностного разряда с последующим перекрытием. При этом величина пробивного напряжения промежутка значительно снижается по сравнению с пробоем в равномерном поле и с пробоем обычного воздушного промежутка.

Наибольший интерес представляет рассмотрение *разряда по поверхности твёрдого диэлектрика в воздухе*, который зависит от типа диэлектрика (его удельной поверхностной проводимости) и состояния его поверхности (увлажнения и загрязнения), что оказывает влияние на перераспределение электрического поля и соответственно на развитие разряда. Это связано с тем, что большинство ЭИК имеют в своей конструкции проходные изоляторы для подвода напряжения.

На рис.4.4 показана зависимость напряжения перекрытия от вида диэлектрика и длины промежутка.

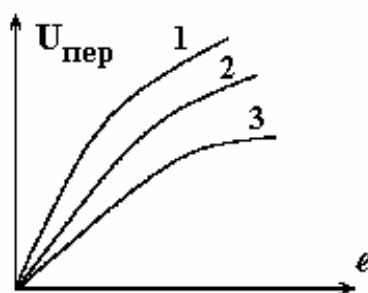


Рис.4.4. Зависимость напряжения перекрытия  $-U_{пер}$  от длины промежутка  $l$   
 1 – Воздух;  
 2 – Парафин;  
 3 – Фарфор, стекло

В резко неоднородном электрическом поле с большой  $E_n$  (случай в) на частоте 50 Гц:

$$U_{кор} = \frac{0,61}{C_{уд}^{0,44}} \text{ [В]}; \quad U_{нов} = \frac{7,8}{C_{уд}^{0,44}} \text{ [В]}, \quad (4.15)$$

Здесь величина  $C_{уд}$  в [Ф/м] зависит от системы электродов.

- Для плоского диэлектрика

$$C_{y\partial} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d}, \text{ где } d - \text{ толщина диэлектрика.} \quad (4.16)$$

- Для цилиндрического диэлектрика

$$C_{y\partial} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (4.17)$$

где:  $r_2, r_1$  – соответственно внешний и внутренний радиусы цилиндра.

- Для многослойного плоского диэлектрика с разными значениями  $\varepsilon$

$$C_{y\partial} = \frac{\varepsilon_0}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\varepsilon_i}} \quad (4.18)$$

- Для многослойного цилиндрического диэлектрика

$$C_{y\partial} = \frac{\varepsilon_0}{r_n \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad (4.19)$$

Для длинных промежутков (опорные и подвесные изоляторы) при  $l=0.2 \div 2$  м напряжение перекрытия практически не зависит от величины -  $E_n$  и может быть рассчитано по эмпирическим уравнениям:

- На переменном напряжении при  $f = 50$  гц

$$U_{пер} = 20 + 335 \cdot l \text{ [кВ]} \quad (4.20)$$

- На импульсном напряжении отрицательной полярности и длительностью  $1,2/50$  мксек

$$U_{пер} = 150 + 650 \cdot l \text{ [кВ]} \quad (4.21)$$

- На импульсном напряжении положительной полярности длительностью  $1,2/50$  мксек

$$U_{пер} = 60 + 520 \cdot l \text{ [кВ]} \quad (4.22)$$

#### **4.4. Разряд при загрязненной и увлажненной поверхности**

Для изоляторов, работающих на открытом воздухе, необходимо учитывать воздействие дождя, тумана, росы и различных загрязнений, которые, оседая на поверхности изолятора, вызывают искажение электрического поля и снижение напряжения перекрытия.

На рис.4.5. показано изменение напряжения перекрытия изолятора от удельной поверхностной проводимости при различном размере вылета ребра (а).

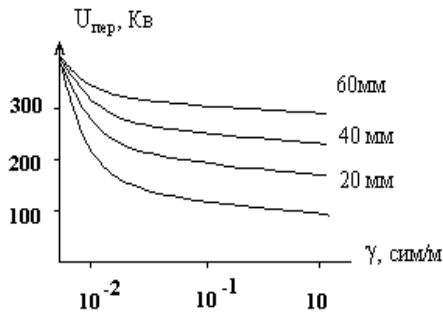


Рис.4.5. Зависимость напряжения перекрытия от удельной поверхностной проводимости изолятора при различном размере вылета ребра

Можно показать, что

$$U_{пер.д} = E_{доп.д} \cdot L_{ут}, \quad (4.23)$$

где:  $L_{ут}$  – длина пути тока утечки;

$E_{доп.д}$  – допустимая напряженность поля при воздействии дождя  
( $E_{доп.д} = 0,025 \div 0,06$  кВ/мм).

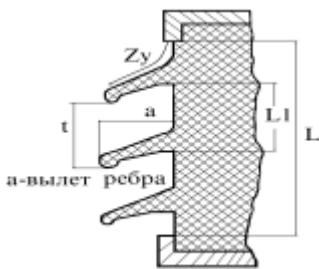


Рис.4.6. Эскиз опорного изолятора

$a$  – вылет ребра;

$t$  – расстояние между ребрами (шаг);

Для повышения  $U_{пер}$  увеличивают вылет ребра ( $a$ ) и делают его нижней поверхность разветвленной, что увеличивает длину пути тока утечки (см. рис.4.6). В ГОСТ 9920-75 нормируется удельная эффективная длина пути тока утечки ( $\lambda_{эфф.}$ ) в зависимости от степени загрязнённости атмосферы и типа изоляторов, а также величина  $L_{у min}$  в зависимости от  $U_n$ .

Напряжение перекрытия при дожде (для  $l_д = 0,1 \div 4$  м) можно рассчитать по формуле

$$U_{пер.д} = 20 + 205 \cdot l_д, \quad [кВ] \quad (4.24)$$

При известных параметрах ребер (вылет ребра, шаг и др.)

$$U_д = 124e^{0.77} + 42 \cdot z \cdot t^{0.6} \frac{a_1}{a}, \quad (4.25)$$

где:  $z$  – число ребер;

$a_1$  – кратчайшее расстояние до ребра;

$t$  – шаг ребер.

### Пример расчета внешней изоляции изоляторов



**категории исполнения 1**

Рассчитаем внешнюю изоляцию проходного изолятора (ввода) для силового трансформатора при  $U_n = 110$  кВ.

1. Из ГОСТ 1516.1-76 найдём:  $U_{cxp} = 295$  кВ,  $U_{mkr} = 215$  кВ,  $U_{имп.} = 480$  кВ (при положительной полярности импульса).
2. Для определения  $l$ , используем эмпирические формулы:

$$U_{пер.cxp} = 20 + 335l_{cxp} \Rightarrow l_{cxp} = \frac{1.1U_{cxp} - 20}{335} = 0.91, [м]$$

$$U_{пер.mkr} = 20 + 205l_{mkr} \Rightarrow l_{mkr} = \frac{1.1U_{mkr} - 20}{205} = 0.95, [м]$$

$$U_{пер.имп} = 60 + 520l_{имп} \Rightarrow l_{имп} = \frac{1.1U_{имп} - 60}{520} = 0.9, [м]$$

Здесь коэффициент  $k = 1.1$  учитывает статистический разброс  $U_{пер}$ . Из трёх найденных значений выбираем наибольшее, т.е.  $l = 0.95$  [м].

3. Рассчитаем количество ребер и их размеры:

$$n = 1.5 + 0,065U_{ном} = 8.65, \text{ примем } n = 9$$

$$t = \frac{l}{n} = 0.95/9 = 0.1$$

$$a = (0.5 \div 1)t \approx 0.05, [м]$$

4. Строим эскиз поверхности изолятора с двумя – тремя ребрами для определения  $L_y$ , приняв уклон ребер 1:2.5 (порядка  $15 \div 25^\circ$ ). Ребро должно иметь капельницу, чтобы вода не смачивала нижнюю поверхность ребра. Найденное значение  $L_y$  сравниваем с  $L_{y \min}$  по ГОСТ для данного района загрязнения.

**Глава 5. Моделирование и расчет жидкой изоляции**

В качестве жидкой изоляции различных ЭИК (трансформаторы, конденсаторы, вводы, кабели и др.) используют как природные, так и синтетические жидкие диэлектрики (масла), основные из которых представлены в таблице 5.1.

По сравнению с газами жидкие диэлектрики обладают более высокой электрической прочностью. Однако это преимущество практически сводится на нет из-за наличия в них различных примесей и влаги. По своим свойствам жидкие диэлектрики могут быть как неполярными, так и полярными. Как и газы, жидкие диэлектрики применяются в производстве различных электрических аппаратах (маслонаполненные кабели, масляные выключатели, трансформаторы и т.д.).

Таблица 5.1

Природные		Синтетические
Растительные	Минеральные (На основе нефти)	
Тунговое	Конденсаторное	Совол, совтол
Льняное	Трансформаторное	Кремнийорганические
Касторовое	Кабельное	Фтороорганические
		На основе полихлордифенилов
		Экологически-безопасные

### 5.1. Расчет пробивного напряжения жидких диэлектриков

На величину пробивного напряжения жидких диэлектриков, как уже отмечалось, очень большое влияние оказывают, имеющиеся в них различные примеси, а также вода и воздух. За счет наличия этих примесей пробой жидких диэлектриков связан с образованием проводящего мостика между электродами, по которому развивается разряд. Кроме того, пробивное напряжение жидкости в значительной степени зависит также от температуры, длительности приложения напряжения, его формы и частоты. Учитывая сильное влияние на  $U_{пр}$  жидких диэлектриков растворенных в них влаги и газа, перед применением масла подвергают сушке и вакуумированию для удаления газа.

На рис. 5.2-5.3 приведены зависимости электрической прочности трансформаторного масла от содержания влаги и длительности импульса.

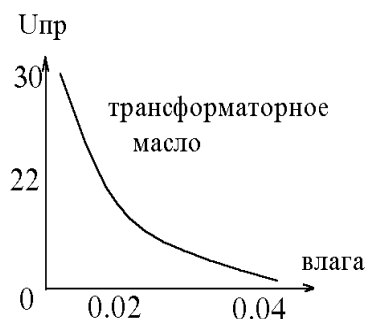


Рис. 5.2

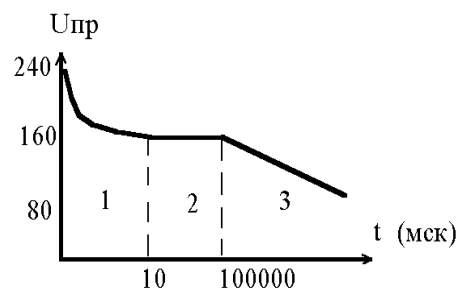


Рис. 5.3

Трансформаторное масло наиболее изучено и для него в литературе известно много эмпирических формул расчета пробивного напряжения.

- В системе коаксиальных цилиндрических электродов:

$$U_{пр} = E_{пр} r \ln \frac{R}{r}, \quad \text{где} \quad E_{пр} = 1 + \frac{37}{\sqrt{r}}, [МВ/м] \quad (5.1)$$

- В системе электродов цилиндр против цилиндра или цилиндр – плоскость на частоте  $f = 50 Гц$  величину  $U_{пр}$  в трансформаторном масле можно определить графически (рис 2.20 Л1).

- В системе электродов остриё-остриё при  $f=50\text{Гц}$

$$U_{np} = 9.9\ell^{0.6} \quad \text{при } l = 200-500 \text{ [мм]} \quad (5.2)$$

- В системе электродов остриё-плоскость при  $f=50\text{Гц}$

$$U_{np} = 3.32\ell^{0.75} \quad \text{при } l = 30-200 \text{ [мм]} \quad (5.3)$$

$$U_{np} = 6.09\ell^{0.64} \quad \text{при } l = 300-800 \text{ [мм]} \quad (5.4)$$

$$U_{np} = 440 + 0.15\ell \quad \text{при } l > 800 \text{ [мм]} \quad (5.5)$$

- В системе электродов острие – плоскость на положительных импульсах длительностью 1.5/50 мксек. при  $l = 100-2000 \text{ [мм]}$

$$U_{np} = 12.8\ell^{0.64} \quad (5.6)$$

Величину пробивного напряжения жидкого диэлектрика можно повысить, увеличивая давление или применяя барьеры.

На рис.5.4 показана зависимость  $U_{np}$  трансформаторного масла от давления в различной системе электродов.

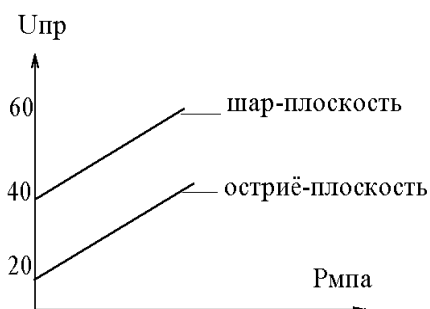


Рис.5.4. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления

## 5.2. Разряд на границе масло - твёрдый диэлектрик

В ЭИК с маслonaполненной изоляцией граница раздела между твёрдым и жидким диэлектриком находится в условиях неравномерного электрического поля. За счет этого наблюдается: коронный, поверхностный разряды, которые переходят в перекрытие. Процесс перекрытия в жидком диэлектрике подчиняется тем же закономерностям, что и в газе, но разрядное напряжение при прочих равных условиях имеет большую величину. Для определения напряжений развития коронного и поверхностных разрядов также используют эмпирические уравнения:

- Для бакелито-бумажной изоляции ( $\varepsilon = 4.5$ ) при частоте  $f=50\text{Гц}$

$$U_{кор} = 121 \cdot \Delta^{0.45} \quad (5.7)$$

$$U_{нов} = 310 \cdot \Delta^{0.45} \quad (5.8)$$

Здесь напряжение измеряется в [кВ], а  $\Delta$  - в [м]

- Для бумажно-масляной изоляции в системе цилиндрических электродов при  $f=50 \text{ Гц}$

$$U_{нов} = 740 \sqrt{\frac{r_2}{\varepsilon} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (5.9)$$

Для конденсаторной бумажно-пропитанной изоляции при частоте  $f=50 \text{ Гц}$  используется формула Кучинского Г.С.

$$U_{кор.неуст.} = 182 \cdot \Delta^{0.42} \quad (5.10)$$

$$U_{кор.уст.} = 327 \cdot \Delta^{0.42} \quad (5.11)$$

- Напряжение перекрытия при частоте  $f=50 \text{ Гц}$  для  $l < 0.15 \text{ м}$  можно также рассчитать:

$$U_{пер} = U_{нов} + E_{\tau} \cdot \ell \quad (5.12)$$

На основе опытных данных установлено, что напряженность поля на границе раздела для бумажно-масляной и бакелито-бумажной ЭИ составляет порядка  $E_{\tau}=600 \div 650 \text{ кВ/м}$ .

### 5.3. Расчет пробивного напряжения маслобарьерной изоляции

Барьеры из твёрдого диэлектрика, помещённые между электродами в масле значительно повышают значение  $U_{пр}$  и находят применение в маслобарьерной изоляции в трансформаторах, проходных изоляторах (вводах), масляных выключателях и др.

На рис.5.5 приведена зависимость соотношения пробивного напряжения трансформаторного масла с барьером и без барьера от расположения барьера.

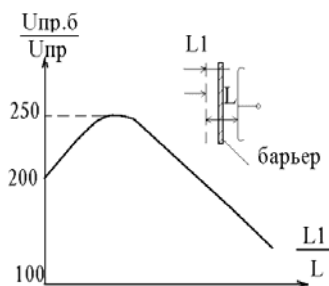


Рис. 5.5

Как следует из рис.5.5., наиболее оптимальным расположением барьера является его удаление от острейшего края на расстояние порядка 20-30% от  $l$ .

- Для такой изоляции на частоте  $f=50 \text{ Гц}$  при  $l = 40 \div 100 \text{ мм}$

$$U_{пр} = 2.85 \left( 1 + \frac{6.77}{\sqrt{\ell}} \right) \ell \quad (5.13)$$

- На импульсном напряжении длительностью 1.5/50 мксек

$$U_{np} = 8.25 \left( 1 + \frac{6.77}{\sqrt{\ell}} \right) \ell \quad (5.14)$$

Рассмотрим в качестве примера расчёт внутренней изоляции высоковольтных вводов с маслобарьерной ЭИ.

Эскиз такого изолятора представлен на рис. 5.6. На токопроводящий стержень радиусом  $r_0$  накладывается подмотка из кабельной бумаги толщиной  $1 \div 3$  мм с  $\varepsilon_1 = 3.5 \div 3.7$  для уменьшения напряженности поля в канале, заполненном трансформаторным маслом с  $\varepsilon_2 = 2.1 \div 2.3$ . В качестве барьера применяется бумажно-бакелитовый цилиндр с  $\varepsilon_3 = 5.0 \div 6.0$ , поверх которого наложена выравнивающая обкладка из алюминиевой фольги. Поверх этой обкладки накладывается подмотка из кабельной бумаги толщиной  $3 \div 5$  мм, затем идет второй масляный канал и т.д.

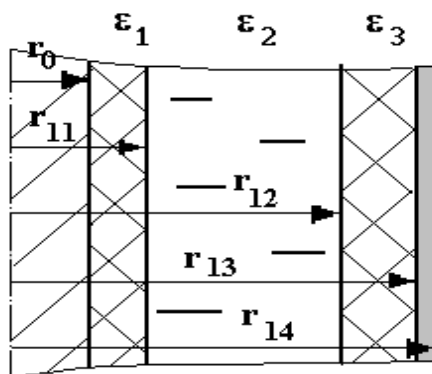


Рис.5.6. Эскиз масляного канала  
 $r_0$  - радиус токопроводящего стержня;  
 $r_{11}$  - радиус бумажной подмотки на токопроводящий стержень;  
 $r_{12}$  - радиус 1-ого масляного канала;  
 $r_{13}$  - радиус бумажно-бакелитового цилиндра;  
 $r_{14}$  - радиус бумажной подмотки на б.б. цилиндр (радиус 1-ой обкладки).

Расчет проводим в следующей последовательности:

1. Задаёмся числом масляных каналов  $n$  и его толщиной в соответствии с величиной номинального напряжения -  $U_{ном.}$  согласно таблице 5.2.

Таблица 5.2

Номинальное напряжение - $U_n$ , кВ	Число каналов $n$
35	1 - 3
110	3 - 5
220	5 - 6
500	6 - 8

2. Определяем напряженность поля в масляном канале

$$U_k = \frac{1,1 \cdot U_{сxp}}{n} \quad (5.15)$$

3. Проверяем масляный канал из условия его электрической прочности, как более слабого звена. При этом должно соблюдаться условие  $E_{max} \leq E_{доп}$

Если рассматривать такую изоляцию как трехслойный диэлектрик, то

$$E_{\max .м} = \frac{U_{\kappa}}{r_1 \varepsilon_2 \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{r_3}{r_2} \right]} \quad (5.16)$$

Максимальная допустимая напряженность в масле может быть определена:

$$E_{\text{доп.масла}} = \frac{1,49}{\left( r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)^{0.31}} \text{ [МВ/м];} \quad (5.17)$$

Если толщина масляных каналов составляет порядка 40÷100 мм, то допустимая напряженность поля обычно находится в пределах  $(4\div 4.5) \cdot 10^6$  МВ/м.

4. Определяем длины выравнивающих конденсаторных обкладок из условия  $C_i \cdot \ell_i = \text{const}$ , где:

$$C_i = \sum_{j=1}^{i=4} C_{ij} \quad - \text{емкость } i\text{-ого канала}$$

$$\text{Здесь } j \text{ — номер канала, а } C_{ij} = \frac{2\pi\varepsilon_i\varepsilon_0}{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad (5.18)$$

5. Длина обкладки у фланца должна быть равна:

$$\ell_n = \ell_{\phi} + 0,1(\ell_{\text{воз}} + \ell_{\text{м}}) \quad (5.19)$$

6. Исходя из условия  $C_i \cdot \ell_i = \text{const}$ , т.е.  $l_1 C_1 = l_2 C_2 = l_3 C_3 = \dots = l_n C_n$  найдем все длины обкладок.

## Глава 6. Моделирование и электрический расчёт твёрдой ЭИ

Можно сказать, что твердые диэлектрики являются основной изоляцией различных ЭИК, так как в отличие от газов и жидкостей кроме электрической нагрузки они несут и механические нагрузки, а в ряде случаев являются одновременно и конструкционным материалом.

В качестве твердой изоляции ЭИК используются как неорганические диэлектрики (фарфор, стекла, слюда и керамика), так и органические диэлектрики (бумага, резина, полимерные пленки, смолы, компаунды, лаки и др.). В отличие от газов и жидкостей твердые диэлектрики не обладают свойством к самовосстановлению электрической прочности после пробоя. Их электрическая прочность сильно зависит как от свойств самого материала (типа диэлектрика, его структуры, степени однородности), так и условий испытания (однородности электрического поля, формы и длительности приложения напряжения, температуры и др.).

В настоящее время различают три основные формы пробоя: электрический, тепловой, электрохимический (ионизационный)

Если диэлектрик имеет однородную структуру, а электрическое поле равномерное или слабо неравномерное, то  $E_{np}$  практически не зависит от температуры и от толщины диэлектрика –  $d$ . В этом случае

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d}, [B / м] \quad (6.1)$$

Реальные твердые диэлектрики всегда содержат различные неоднородности, обусловленные неоднородностью его структуры или технологией изготовления, поэтому при определении их электрической прочности обычно используют эмпирические формулы.

- Для фарфора высокого качества

$$E_{np} = \frac{1.72}{\sqrt[3]{d}}, [мВ / м] \quad (6.2)$$

- Для фарфора среднего качества

$$E_{np} = \frac{0.8}{\sqrt{d}}, [мВ / м] \quad (6.3)$$

В слабонеоднородном поле (сфера-плоскость) электрическая прочность может быть определена:

$$E_{np} = 85 \cdot d^{-0.37}, [кВ / см] \quad \text{при } R \geq 0,4d \text{ или} \quad (6.4)$$

$$E_{np} = 65 \cdot d^{-0.5}, [кВ / см] \quad \text{при } R < 0,4d. \quad (6.5)$$

Обычно величина  $E_{np}$  для фарфора не превышает 25÷30 кВ/мм.

- Для эпоксидных смол и компаундов на ее основе

$$E_{np} = \frac{1.83}{\sqrt{d}}, [мВ / м] \quad (6.6)$$

### 6.1. Расчёт пробивного напряжения при тепловом пробое

При повышенных температурах и больших толщинах диэлектрика, когда условия теплоотвода затруднены и может нарушаться условие теплового равновесия между выделенным и отведенным количествами тепла может развиваться тепловой пробой. Количество выделяемого в диэлектрике тепла пропорционально диэлектрическим потерям, т.е.

$$Q_{выд} = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg \delta_t, \quad (6.7)$$

Здесь  $tg \delta_t = tg \delta_0 e^{a(T-T_0)}$

Согласно рис.6.1 тепловое равновесие между выделенным и отведенным количеством тепла имеет место при температурах  $T_1$  и  $T_{кр}$ . В точке А при  $T_{кр}$  имеет место неустойчивое тепловое равновесие, которое может быть взято за условие развития теплового пробоя. Тогда

$$U_{пр} = \varphi(c) \sqrt{\frac{A \cdot \lambda}{a \cdot \varepsilon \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta_0}} \cdot 10^6, [B] \quad (6.8)$$

Здесь  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности диэлектрика;  
 $A$  - коэффициент, зависящий от условий охлаждения;  
 $a$  - температурный коэффициент изменения  $\operatorname{tg} \delta$ ;  
 $\varphi(c)$  - функция, зависящая от параметра  $c$ .

При одностороннем охлаждении  $A=36$ , а при двухстороннем охлаждении  $A=144$ .

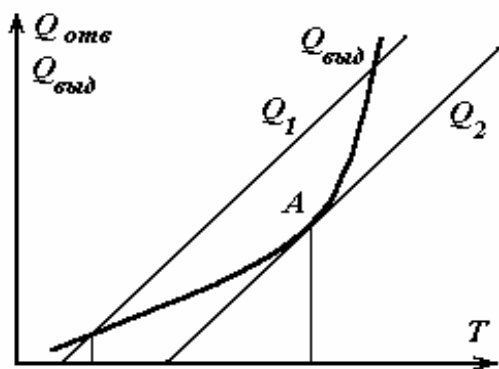


Рис.6.1. Зависимость выделенного и отведенного количества тепла от температуры

## 6.2. Моделирование и расчёт комбинированной ЭИ

В большинстве ЭИК (кабели, высоковольтные вводы, трансформаторы, конденсаторы и др.) применяется комбинированная изоляция, к которой можно отнести: маслобарьерная; бумажно-масляная, бумажно-бакелитовая, бумажно-пленочная и др. Расчёт такой комбинированной ЭИ обычно проводят для конкретных конструкций, учитывая их особенности. Как правило, основу комбинированной изоляции составляют различные сочетания таких материалов, как бумага, полимерная пленка, пропитывающие жидкости (масла) и барьеры из бумажно-бакелитовых материалов. Так как бумага, входящая в состав комбинированной изоляции, характеризуется большой пористостью структуры, то при конструировании ЭИК наибольшее внимание уделяется выбору рабочей напряженности электрического поля для бумаги из условия отсутствия ионизации:

$$E_{раб} = E_{нач.} - 3\sigma_{нач.} ; E_{исп} = E_{крит.} - 3\sigma_{крит.}$$

С учетом этого для бумажно-масляной изоляции при  $0.03 < d < 1.0$  [мм]:

$$E_{раб} = 3,6d^{-0.5} [\text{кВ/мм}]; \quad (6.9)$$

для бумажно-бакелитовой изоляции



$$E_{раб} = 9.5d^{-0.58} \text{ [кВ/мм]}, \quad (6.10)$$

Для бумажно-пленочной изоляции значение  $E_{раб}$ , как правило, выше на 35%. Так допустимые значения рабочей напряженности поля  $E_{раб}$  в бумажной компоненте (при пропитке трихлордифенилом) составляют 16-18 [кВ/мм], а  $E_{раб}$  в плёнке 40-50 [кВ/мм].

Рассмотрим в качестве примеров расчет высоковольтных вводов и конденсаторов с бумажно-масляной изоляцией.

### Пример 1. Расчёт высоковольтного ввода с комбинированной бумажно-масляной (БМ) изоляцией.

Расчет производим в следующей последовательности:

1. Исходя из технического задания (по заданному значению  $U_{ном}$ ) по ГОСТ 1516-76 находим  $U_{сxp}$ ,  $U_{\delta}$  и  $U_{имп}$ .
2. Выполняем расчет наружной изоляции, принимая за расчетное напряжение  $U_0 = 1.1U_{сxp}$  и находим величину  $l_{сxp} = l_{воз}$ .
3. Длину масляной части ввода ( $l_m$ ) находим из условия развития разряда в масле

$$l_m = \frac{1.1 \cdot U_{сxp}}{E_{доп.м}}, \quad (6.11)$$

где  $E_{доп.м} = 800$  [кВ/м]- допустимая напряженность в масле.

Эскиз внутренней изоляции ввода показан на рис.6.2.

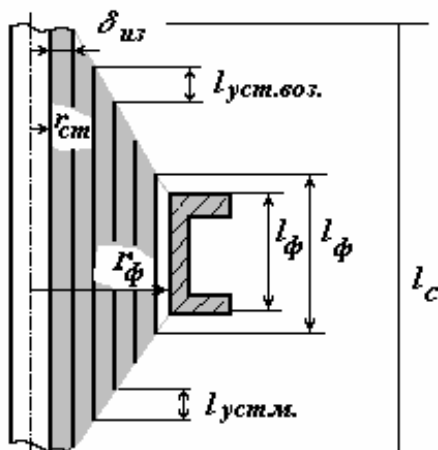


Рис. 6.2. Эскиз внутренней изоляции высоковольтного ввода с бумажно-масляной или бумажно-твердой изоляцией

- 1- токопроводящий стержень;
- 2- изоляционный остов;
- 3- фланец

4. Для выравнивания электрического поля применяем конденсаторные обкладки и с учетом этого выбираем число ( $Z = 3.6 \div 5$ ) и величину  $E_{r.доп} \cong 8 \div 10$  [мВ/м]. Следует иметь ввиду, что увеличение числа  $Z$  из условия обеспечения минимального объема ввода приводит к росту максимальной напряженности поля.

5. Радиус обкладки у стержня ( $r_{cm}$ ) находим из допустимой напряженности электрического поля  $E_{r.\dot{d}on}$  в изоляции у токопроводящего стержня (ТПС)

$$r_{cm} = \frac{U_0}{2E_{r.\dot{d}on}} \cdot \frac{1+Z}{Z \ln Z} \quad (6.12)$$

6. По условию допустимой плотности тока найдем

$$r_{cm} = \sqrt{\frac{I_{ном}}{\pi j_{дон}}} \quad (6.13)$$

7. Из найденных значений -  $r_{cm}$  выбираем наибольшее.

8. Так как наибольшая напряженность поля образуется в бумажной изоляции у токопроводящего стержня, то значение -  $r_{cm}$  необходимо уточнить из условия отсутствия ионизации (короны)

$$U_{\kappa} = 5.1 \cdot 10^4 \sqrt{\delta_{из}} \quad [\text{В}], \text{ где } \delta \text{ [мм]} \quad (6.14)$$

9. Средняя радиальная рабочая напряженность поля с учетом короны

$$E_{r.cp} = \frac{U_{\kappa}}{\delta_{из}}, \quad (6.15)$$

10. Тогда допустимая напряженность поля в радиальном направлении при отсутствии короны

$$E_{r.\dot{d}on} = E_{r.cp} \frac{U_0}{U_{ном}} \sqrt{3} \quad (6.16)$$

11. Уточняем значение  $r_{cm}^*$  из условия отсутствия короны

$$r_{cm}^* = \frac{U_0}{2E_{r.\dot{d}on}} \cdot \frac{1+Z}{Z \ln Z} \quad (6.17)$$

Если найденное значение  $r_{cm}^*$  окажется меньше  $r_{cm}$  по допустимой плотности тока, то принимается наибольшее значение, которое округляется.

При определении радиуса стержня  $r_{cm}$  необходимо также обеспечить его механическую прочность на разрыв. Исходя из этого величина  $r_{cm}$  может быть еще увеличена, что только снизит действующую напряженность поля у стержня.

При достаточно большой разнице между значениями  $r_{cm}$  из допустимой напряженности поля и допустимой плотности тока вместо стержня применяют токопроводящую трубу, внутренний радиус которой найдем

$$r_{внутр} = \sqrt{r_{cm}^2 - \frac{I_{ном}}{\pi j_{дон}}} \quad (6.18)$$

12. Радиус обкладки у фланца  $r_{\phi}$  найдем:

$$r_{\phi} = r_{cm} \cdot Z \quad (6.18)$$

13. Длину обкладки у фланца определим из уравнения

$$\ell_{\phi} = 0,75 \cdot \frac{\ell_{в} + \ell_{м}}{Z - 1} \quad (6.19)$$

14. Длину обкладки у стержня найдем

$$\ell_c = \ell_\phi \cdot Z \quad (6.20)$$

15. Число основных обкладок получим

$$n = \frac{r_\phi - r_{см}}{\delta_{из.ср}} \quad (6.21)$$

В таблице 6.1 приведены данные о рекомендуемом количестве основных и дополнительных обкладок в зависимости от величины номинального напряжения.

Таблица 6.1.

Un, кВ	Количество уравнивающих обкладок	Количество основных обкладок	Количество дополнительных обкладок
110	20	20	-
150	30	30	-
220	45	15	30
330	60	20	40
500	90	30	60

16. Определяем длину уступа  $l_{уст}$

$$\ell_{уст} = \frac{\ell_c - \ell_\phi}{n} \quad (6.22)$$

Найденное значение  $l_{уст}$  округляем исходя из технологических соображений. После этого уточняем значение  $\delta_{из}$  и проводим все проверочные расчеты согласно вышеприведенным пунктам.

17. Определение длин всех обкладок и их радиусов может проводиться по двум вариантам:

а) Обеспечение постоянства длин уступов и толщин слоев изоляции. В этом случае радиальная и аксиальная напряженности поля непостоянны и для обеспечения заданных разрядных характеристик приходится увеличивать диаметр и длину ввода.

б) Обеспечение постоянства аксиальной напряженности поля при постоянстве длин уступов. В этом случае при выполнении условия постоянства емкости между соседними обкладками толщина изоляционного слоя между соседними обкладками и радиальная напряженность поля будут различными. Для таких вводов выполняются условие  $rE_r = const$ .

- В первом варианте длина текущей обкладки находится

$$\ell_i = \ell_\phi + (i - 1)l_{уст} \quad (6.23)$$

- Радиус текущей обкладки

$$r_i = r_\phi - i \cdot \delta_{из.ср} \quad (6.24)$$

- Во втором варианте при постоянстве длины уступа радиус текущей обкладки находим из уравнения огибающей

$$r_i = e^{a-b \cdot \ell_i^2}, \text{ где} \quad (6.25)$$

$$a = \ln r_{cm} + \ln \frac{r_\phi}{r_{cm}} \cdot \frac{\ell_{cm}^2}{\ell_{cm}^2 - \ell_\phi^2}, \quad (6.26)$$

$$b = \frac{\ln \frac{r_\phi}{r_{cm}}}{\ell_{cm}^2 - \ell_\phi^2} \quad (6.27)$$

18. Для нахождения остальных требуемых величин обозначим:

$$K_i = \frac{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{\ell_i} \quad (6.28)$$

19. Емкость слоев изоляции

$$C_i = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{K_i} \quad (6.29)$$

20. Падение напряжения на слое при рабочем напряжении

$$\Delta U_{i.pab} = \frac{U_{pab} \cdot K_i}{\sum K_i} \quad (6.30)$$

21. Рабочая напряженность поля в слое

$$E_{i.pab} = \frac{\Delta U_{i.pab}}{r_{i-1} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \quad (6.31)$$

22. Падение напряжения в слое при  $U_{cxp}$

$$\Delta U_{i.cxp} = \frac{U_{cxp} \cdot K_i}{\sum K_i} \quad (6.32)$$

23. Напряженность поля на слое при  $U_{cxp}$

$$E_{i.cxp} = \frac{\Delta U_{i.cxp}}{r_{i-1} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \quad (6.33)$$

24. Аксиальная напряженность на слое при  $U_{cxp}$

$$E_{i.a} = \frac{\Delta U_{i.cxp}}{\ell_{уст}} \quad (6.34)$$

25. Все данные расчета сводим в таблицу 6.2.

Таблица 6.2

$i$	$R_i$ м	$l_i$ м	$K_i$	$C_i$ Ф/м	$\Delta U_{i,раб}$ в	$E_{i,раб}$ В/м	$\Delta U_{i,сxp}$ в	$E_{i,сxp}$ В/м	$E_{i,a}$ В/м
1									

26. Делаем проверочные расчеты из условия отсутствия короны и возможности пробоя какого-либо слоя:

$$\Delta U_{i,раб} \leq U_{кор}; \quad \sum \Delta U_{i,сxp} \leq U_{сxp}; \quad E_{i,сxp} \leq E_{r.дон}$$

Если эти условия не выполняются, то между основными обкладками ставят добавочные обкладки или применяют манжеты, что позволяет повысить напряжение возникновения разрядов в 1,5÷2 раза. После электрического расчета выполняют конструктивные расчеты и проводят проверку тепловой устойчивости.

### Пример 2. Моделирование и расчёт косинусного конденсатора с комбинированной изоляцией:

Косинусные конденсаторы широко используются в различных областях электроэнергетики для повышения коэффициента мощности. Такие конденсаторы изготавливаются на основе бумажно-масляной и бумажно-пленочной изоляции, пропитанной минеральным (конденсаторным) маслом или синтетическими жидкостями. Расчет таких конденсаторов заключается в определении наиболее оптимальных их размеров путем подбора соответствующего типа диэлектрика и пропитывающей жидкости с целью обеспечить тепловую устойчивость и заданный срок службы.

Расчет обычно проводится в следующей последовательности:

1. Исходя из технического задания, в котором оговариваются назначение конденсатора, значения  $\cos \varphi$ ,  $U_n$ ,  $C_k$  и др. параметры выбираем материал изоляции и задаем его толщину между обкладками секции:

$$d = (n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2), \quad (6.35)$$

где  $n_1, \delta_1$  – соответственно число слоев и толщина одного листа бумаги;  $n_2, \delta_2$  – соответственно число слоев и толщина пленки.

Для изготовления косинусных конденсаторов обычно используется конденсаторная бумага марки КОН-1, КОН-2 или СИЛКОН с плотностью от 0.8 до 1.2 г/см<sup>3</sup>. В случае бумажно-масляной изоляции толщина бумаги между обкладками берется в пределах от 40 до 120 мкм, что соответствует 6÷10 слоям при толщине одного листа 8-12 мкм.

Для мощных конденсаторов переменного тока вместо емкости в техническом задании может быть указана реактивная мощность  $Q_p$ . В этом случае:

$$C_{ном} = \frac{Q_p}{2\pi f U_{раб}^2} [\Phi] \quad (6.36)$$

2. Рабочую напряженность поля находим из условия устранения возможности развития ионизации

$$E_{раб} = E_{нач.} - 3\sigma_{нач.}, \quad (6.37)$$

где  $E_{нач.} = 3,6d^{-0.5}$ , а  $\sigma_{нач.} = (0.10-0.15)E_{нач.}$

Опыт показывает, что для бумажно-масляной изоляции допустимая рабочая напряженность поля может составлять 14÷18 кВ/мм, для бумажно-пленочной изоляции – 30÷35 кВ/мм, а для пленки – 40÷50 кВ/мм.

3. Конденсатор собирается из отдельных секций, соединенных последовательно и параллельно. Количество последовательно соединённых секций найдем:

$$n_{посл} = \frac{U_{раб}}{E_{раб}(n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2)} \quad (6.38)$$

4. Емкость секции рассчитаем, задаваясь ее размерами (толщиной  $\Delta_c$ , шириной  $h_c$  и длиной  $b_c$  секции) согласно рис.6.3. Длина секции  $b_c$  определяется шириной бумажных лент, применяемых при намотке секций. Обычно, во избежания образования морщин при намотке, ширина бумажных лент выбирается не более 280 мм.

$$C_c = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (b - 2\Delta \ell)(h - \Delta_c + \frac{\pi}{4} \Delta_c \cdot k_3) \Delta_c k_3^2}{(n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2)(n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2 + \Delta \phi)}, \quad (6.39)$$

Здесь  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость, которая в случае бумаги, пропитанной жидким диэлектриком, определяется:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_k}{\frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_n} - k_n \frac{\gamma_{\bar{\delta}}}{\gamma_k} \left( \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_n} - 1 \right)} \quad (6.40)$$

Для комбинированной (бумажно-пленочной изоляции):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\bar{\delta}} \varepsilon_{nl}}{\varepsilon_{\bar{\delta}} \frac{\delta_{nl}}{\delta} + \varepsilon_{nl} \frac{\delta_{\bar{\delta}}}{\delta}}, \quad (6.41)$$

где:  $\varepsilon_{\bar{\delta}}$ ,  $\varepsilon_k$ ,  $\varepsilon_{nl}$ ,  $\varepsilon_n$  – соответственно диэлектрическая проницаемость бумаги, клетчатки, пленки и пропитывающего состава;  $\gamma_{\bar{\delta}}$ ,  $\gamma_k$  – соответственно плотность бумаги и клетчатки;  $\delta$ ,  $\delta_{\bar{\delta}}$ ,  $\delta_{nl}$  - соответственно общая толщина, толщина бумаги и пленки;  $k_n$  – коэффициент запрессовки, учитывающий плотность намотки бумаги.

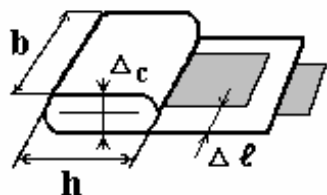


Рис. 6.3. Эскиз секции

$b$  - ширина секции;  
 $h$  - высота секции;  
 $\Delta_c$  - толщина секции,  
 $\Delta \ell$  - закраина

5. Число параллельных секций найдем:

$$n_{пар} = \frac{C_k}{C_c} n_{посл} \quad (6.42)$$

6. Компонуем секции в пакет и рассчитываем изоляцию от корпуса.

$$\Delta_k = \frac{U_{исп}}{E_{пр}} k_{зан}, \quad (6.43)$$

где  $K_{зан} = (2-3)$ , коэффициент запаса;

$U_{исп}$  – испытательное напряжение;

$E_{пр}$  – электрическая прочность изоляции от корпуса.

Как правило, найденное значение толщины корпусной изоляции увеличивают исходя из возможного механического повреждения при сборке конденсатора.

## Глава 7. Основы теплового расчета в ЭИС

Одной из причин отказа ЭИК является тепловое разрушение при нарушении тепловой устойчивости (теплового равновесия). Это может наблюдаться, когда выделяемое в ЭИК тепло (потери энергии) при приложении электрической нагрузки превысит теплоотдачу в окружающую среду.

### **Основными причинами выделения тепла в ЭИК являются:**

- ⇒ потери энергии в токопроводящих элементах (ТПС, ТПЖ, обмотки трансформаторов, обкладки конденсаторов и др.);
- ⇒ диэлектрические потери в изоляции (за счет электропроводности и поляризации);
- ⇒ потери в металлических частях ЭИК (конденсаторные обкладки в/в вводов, экраны в кабелях и др.).

### **Теплоотвод в свою очередь определяется:**

- ⇒ теплопроводностью материалов, входящих в конструкцию ЭИК (материала диэлектрика, обкладок, корпуса и др.);
- ⇒ рассеивающей поверхностью ЭИК;
- ⇒ температурой окружающей среды;
- ⇒ условиями внешнего теплоотвода (естественное воздушное, искусственное).

В основе теплового расчета лежит подобие тепловых и электрических полей, которые описываются математически аналогичными уравнениями. Например, электрическому току условно соответствует тепловой поток, раз-

ности потенциалов – разность температур, электрическому сопротивлению – тепловое сопротивление, электропроводности – теплопроводность и т.д.

Благодаря этой аналогии можно пользоваться основными соотношениями теории электрических цепей и рассматривать эквивалентные схемы из тепловых сопротивлений для заданной конструкции ЭИК.

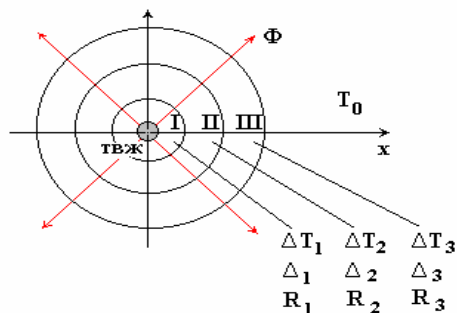
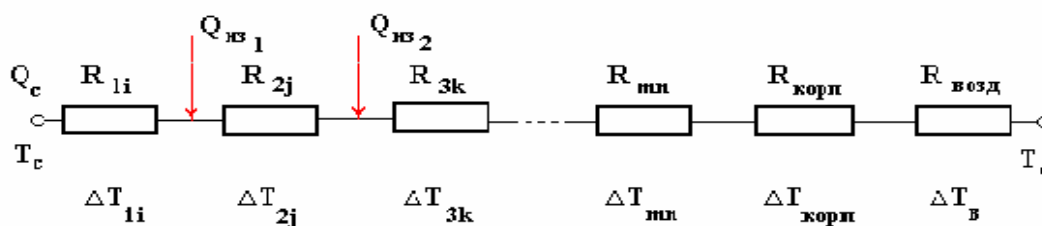


Рис.7.1.

Рассмотрим это на примере цилиндрической системы (для в/в вводов, кабелей, конденсаторов).

Рис.7.2. Тепловая схема замещения при наличии корпуса, оболочки:



В данном случае  $R_{1i}$  - тепловое сопротивление на участке I, которое может состоять из тепловых сопротивлений отдельных слоев.

$$R_{1i} = \sum_{i=1}^n R_i \tag{7.1}$$

Аналогично

$R_{2j}, R_{3k}, R_{mn}$  – тепловые сопротивления II, III, ... n участков;

$R_k$  – тепловое сопротивление корпуса, оболочки кабеля и т.д.;

$R_b$  – тепловое сопротивление воздуха.

На каждом тепловом сопротивлении возникает перепад температур соответственно  $\Delta T_{1i}, \Delta T_{2j}, \Delta T_{3k}, \Delta T_{mn}, \Delta T_{корп}, \Delta T_{возд}$ .

Из тепловой схемы замещения можно записать:

$$T_{max} = T_c = T_0 + \Delta T_{возд} + \Delta T_{корп} + (\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \dots + \Delta T_n) \tag{7.2}$$

Здесь:  $T_0$  – температура окружающей среды;

$T_c$  – температура ТПС (ТВЖ).



Тепловой расчет проводим, исходя из следующих допущений:

⇒ непрерывность теплового потока;

⇒ теплоотвод осуществляется только в радиальном направлении (теплоотводом в аксиальном направлении пренебрегаем).

### 7.1. Тепловыделение в токоведущих частях

Тепловыделение в токоведущих частях возникает от рабочего тока, тока перегрузки и токов к.з. При тепловых расчетах ЭИК перегревом от токов перегрузки и к.з. в первом приближении можно пренебречь, учитывая кратковременность их действия и тепловую инерционность системы. Тепловыделение в единицу времени от рабочего (номинального) тока:

$$q_c = I_n^2 \cdot R_t = I_n^2 \cdot \frac{l}{S_c} \cdot \rho_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (7.3)$$

Здесь:  $I_n$  – величина рабочего (номинального) тока, А;

$\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление материала ТПС при температуре  $T_0$ ;

$S$  – сечение ТПС, м<sup>2</sup>;

$l$  – длина ТПС, м;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления металла, 1/град.

На переменном токе необходимо учитывать увеличение сопротивления проводника за счет вытеснения тока на поверхность.

$$R_{t_{\approx}} = R_{t_{-}} \cdot F(\beta) \quad (7.4)$$

$$\beta = 1,407 \cdot D \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}} ; \quad (7.5)$$

Здесь:  $D$  – диаметр проводника (м);

$\rho$  – удельное сопротивление;

$f$  – частота.

Если  $\beta < 3$ , то  $F(\beta)$  находим по таблице 7.1:

Таблица 7.1

$\beta$	< 0.5	1	1.5	2.0	2.5	3.0
$F(\beta)$	1.00	1.01	1.03	1.08	1.18	1.30

$$\text{Если } \beta > 3, \text{ то } F(\beta) = \frac{\sqrt{2} \cdot \beta + 1}{4} \quad (7.6)$$

На практике величина протекающего тока может изменяться во времени, однако, учитывая большую тепловую инерционность ЭИК можно вести расчет на  $I_{\text{экв}}$ :

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{\tau_n} \cdot \int_0^{\tau_n} i^2 \cdot d\tau}; \quad (7.7)$$

здесь:  $\tau_n$  – период повторения нагрузок;  
 $i$  – изменяющийся во времени ток.

Для конденсаторов ток в обкладках уменьшается по длине:

$$I = I_0 \cdot \frac{\ell - x}{\ell}; \quad (7.8)$$

Здесь:  $I_0$  – начальное значение тока в начале обкладки;  
 $x$  – расстояние от места подвода тока;  
 $\ell$  – длина обкладки.

С учетом этого эффекта тепловыделение в обкладке:

$$P_{\text{обкл}} = \int_0^{\ell} I^2 \cdot \rho \cdot \frac{dx}{h \cdot \Delta} = \frac{I_0^2}{3 \cdot h \cdot \Delta} \cdot \rho \cdot \ell; \quad (7.9)$$

Здесь:  $\Delta$  – толщина обкладки;  
 $h$  – ширина обкладки;  
 $\ell$  – длина обкладки.

В данном уравнении:

$$r_{\text{экв}} = \frac{\rho \cdot \ell}{3 \cdot h \cdot \Delta}, \quad (7.10)$$

т.е. за счет уменьшения тока по длине обкладки величина сопротивления уменьшается в три раза.

## 7.2. Тепловыделение в электрической изоляции

Тепловыделение в ЭИК происходит за счет диэлектрических потерь:

$$q_{\text{из}_i} = P_{\partial_i} = \Delta U_i^2 \cdot \omega \cdot C_i \cdot \text{tg} \delta_i \quad (7.11)$$

Здесь:  $\Delta U_i$  – падение напряжения на участке (слое);  
 $\omega$  – угловая частота;  
 $C_i$  – емкость рассматриваемого участка слоя;  
 $\text{tg} \delta$  – значение  $\text{tg} \delta$  на участке при  $T = T_i$ .

В случае несинусоидального напряжения:

$$q_{\text{из}} = \sum_{k=1}^{k=n} \Delta U_{i_k}^2 \cdot \omega_k \cdot C_i \cdot \text{tg} \delta_i, \text{ где} \quad (7.12)$$

$\Delta U_{i_k}$ ,  $\omega_k$  – соответственно напряжение и частота  $k$ -той гармоники.

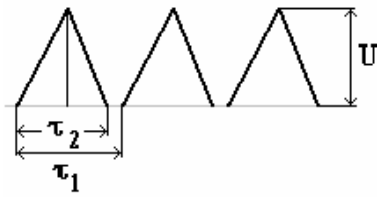


Рис.7.3. Импульсное напряжение треугольной формы

Для импульсов треугольной формы (рис.7.3)

$$q_{из} = \frac{U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg \delta}{8} \cdot \frac{0,78 \cdot \tau_1^2}{\tau_2^2} \quad (7.13)$$

Здесь  $\tau_1$  – длительность периода;  
 $\tau_2$  – длительность импульса;

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau_1} \text{ - частота следования импульсов.}$$

В принципе импульсное напряжение можно разложить на гармонические составляющие и производить расчет тепловыделения по (7.12). Более точный расчет ЭИК на несинусоидальном напряжении производится на макетах этих конструкций. При расчетах  $q_{из}$  необходимо подставлять значения  $C$  и  $tg \delta$  с учетом типа изоляции и температуры на участке.

В случае многослойной изоляции

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (7.14)$$

Тогда:

$$tg \delta = \frac{tg \delta_{к}}{1 + \frac{\epsilon_{к} \cdot (\rho_{к} \cdot \rho)}{\epsilon_{жс} \cdot \rho}} + \frac{tg \delta_{жс}}{1 + \frac{\epsilon_{жс} \cdot \rho}{\epsilon_{к} \cdot (\rho_{к} \cdot \rho)}} \quad (7.15)$$

Здесь:

$tg \delta_{к}$ ,  $tg \delta_{жс}$  – соответственно значение  $tg \delta$  клетчатки и пропитывающей жидкости (масла);

$\epsilon_{к}$ ,  $\epsilon_{жс}$  – диэлектрическая проницаемость клетчатки и жидкости;

$\rho_{к}$ ,  $\rho$  – плотность клетчатки и бумаги.

$$\epsilon_{к} = \frac{\epsilon_{жс}}{1 + \frac{\rho}{\rho_{к}} \cdot K_3 \cdot \left(\frac{\epsilon_{жс}}{\epsilon_{к}} - 1\right)} \quad (7.16)$$

Здесь  $K_3$  – коэффициент запрессовки.

Если изоляция по участкам различная, что имеет место при градировании или комбинированной изоляции, то:

$$q_{из} = q_{из1} + q_{из2} + q_{из3} + \dots + q_{изn} = \sum_{i=1}^n q_{изi} \quad (7.17)$$

Если на пути движения теплового потока встречаются другие активные участки, где имеет место тепловыделение в проводниках (трехжильный концентрический кабель и др.), то:

$$q = q_{c1} + q_{uz1} + q_{c2} + q_{uz2} + \dots + \sum_{i=1}^n (q_{ci} + q_{uzi}) \quad (7.18)$$

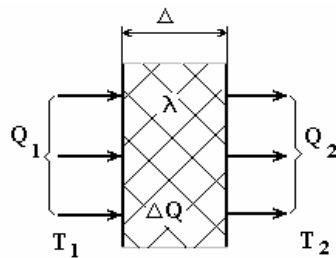
## 7.2. Расчет температуроперепадов

При определении температуроперепадов исходим из теплового закона Ома:

$$Q = \frac{\Delta T}{R}; \quad (7.19)$$

$$R = \frac{\Delta}{\lambda \cdot S} \quad (7.20)$$

Здесь:  $R$  – тепловое сопротивление;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $S$  – поверхность охлаждения;  
 $\Delta$  – толщина диэлектрика;  
 $\Delta T$  – перепад температуры.



Согласно уравнения Фурье для теплового потока (рис.7.4)

$$\Delta Q = \lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (7.21)$$

Рис.7.4.

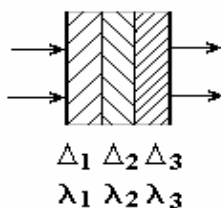
После интегрирования и нахождения постоянных:

$$q = \frac{\lambda_i}{\Delta_i} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{\lambda_i \cdot \Delta T_i}{\Delta_i} \quad (7.22)$$

$$\text{Отсюда: } \Delta T = q \cdot \frac{\Delta_i}{\lambda_i} \quad (7.23)$$

Аналогичное уравнение получим, исходя из теплового закона Ома.

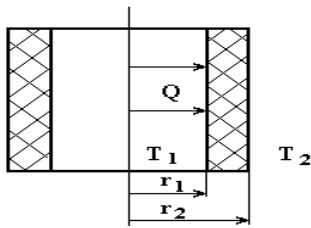
⇒ В случае многослойного диэлектрика (рис.7.5)



$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T_n = q \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i}{\lambda_i} \quad (7.24)$$

Рис.7.5

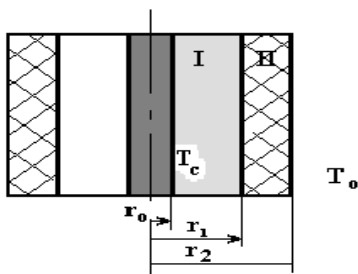
⇒ В случае цилиндрической системы (рис.7.6)



$$\Delta T = q \cdot \frac{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_i} \quad (7.25)$$

Рис.7.6.

⇒ В нашем случае (рис. 7.7. для в/в ввода на участке I)



$$\Delta T_1 = \left( q_c + \frac{q_{uz}}{2} \right) \cdot \frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_1} \quad (7.26)$$

Здесь:  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности изоляции 1-ого участка

Рис.7.7.

⇒ В случае комбинированной изоляции:

При параллельном расположении слоев фольги, бумаги и пленки:

$$\lambda_{экр} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \Delta_i}{\sum_{i=1}^n \Delta_i} \quad (7.27)$$

При последовательном включении слоев:

$$\lambda_{экр} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i}{\lambda_i}} \quad (7.28)$$

здесь:  $\Delta_i$ ,  $\lambda_i$  – соответственно толщина и коэффициент теплопроводности  $i$ -того слоя.

При расчетах коэффициентов  $\lambda$  необходимо также учитывать направление теплового потока (вдоль слоев изоляции  $\lambda_{||}$  или поперек слоев -  $\lambda_{\perp}$ ).

Аналогично ведется расчет  $\Delta T$  для 2, 3 и др. участков. При наличии фарфоровой покрышки, ее температуроперепад находят:

$$\Delta T_{\phi} = \left( q_c + q_1 + \dots + \frac{q_{\phi}}{2} \right) \cdot \frac{\ln \frac{r_{нар}}{r_{вн}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\phi}} \quad (7.29)$$

здесь:  $r_{нар}$ ,  $r_{вн}$  – наружный и внутренний радиусы фарфоровой покрышки;

$\lambda_{\phi}$  – коэффициент теплопроводности фарфора.

Суммарный температуроперепад найдем как сумму перепадов температур на отдельных участках

$$\sum \Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T_n + \Delta T_{\phi} \quad (7.30)$$

Температура на поверхности изделия (корпуса)

$$T_{пов} = T_c - \sum \Delta T \quad (7.31)$$

⇒ Температуроперепад в воздухе

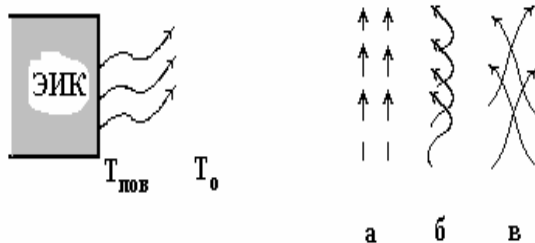


Рис.7.8. Режим перемещения воздуха при конвективном теплообмене

- а) - ламинарный (слоистый);
- б) - волоконообразный;
- в) - вихреобразный;

Отвод тепла от поверхности нагретого тела осуществляется:

⇒ Конвективным теплообменом (перенос тепла перемещением слоев воздуха относительно поверхности изделия):

⇒ Теплообменом за счет излучения (отвод тепла в виде электромагнитной энергии)

При конвективном теплообмене:

$$Q = \alpha_k \cdot S \cdot (T_k - T_0), \quad (7.32)$$

здесь:  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией;

$S$  – рассеивающая поверхность охлаждения;

$T_k$  – температура поверхности изделия.

Коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене является сложной функцией различных величин (размера и формы конструкции, скорости течения воздуха и т.д.). Расчет коэффициентов теплоотдачи проводят на основе критериев подобия:

⇒ **Критерий Нуссельта** - характеризует интенсивность процесса конвективного теплообмена.

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda}, \quad (7.33)$$

Здесь:  $l$  – геометрический размер;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности среды (газа).

⇒ **Критерий Грасгофа** - характеризует интенсивность движения газа или жидкости.

$$Gr = g \cdot \beta \cdot \frac{\ell^3}{\nu^2} \cdot \Delta T \quad (7.34)$$

Здесь:  $g$  – ускорение свободного падения;

$\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения среды;

$\nu$  – кинематическая вязкость среды.

⇒ **Критерий Прандтля** - характеризует теплофизические свойства среды

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (7.35)$$

Здесь:  $\mu = \rho \cdot \nu$  - динамический коэффициент вязкости среды (жидкости или газа);

$$a = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \text{ - температуропроводность}$$

$\rho$  – плотность жидкости или газа;

$C_p$  – удельная теплоемкость жидкости или газа

При использовании критериев подобия необходимо учитывать, что должно соблюдаться условие подобия геометрических, температурных и скоростных полей. Связь критериев подобия можно выразить уравнением:

$$Nu = f(Gr \cdot Pr) = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (7.36)$$

Параметры  $C$  и  $n$  можно взять из таблицы 7.2 в зависимости от произведения ( $Pr \cdot Gr$ )

Таблица 7.2

$Gr \cdot Pr$	$C$	$n$
$10^{-4} \div 10^{-3}$	0.5	0

$10^{-3} \div 10^{-2}$	1. 18	0. 125
$5 \cdot 10^{-2} \div 2 \cdot 10^7$	0. 58	0. 25
$2 \cdot 10^7 \div 10^{13}$	0. 135	0. 33

Определив значение  $Nu$ , найдем

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{\ell} \quad (7.37)$$

В случае, когда в корпусе имеется рубашка охлаждения (т.е. при наличии прослойки жидкости или газа), то при расчете значения  $\alpha_k$  нужно брать  $\lambda_{\text{экв}} = \lambda \cdot \varepsilon_k$ , где значение  $\varepsilon_k$  находится:

Таблица 7.3

$\varepsilon_k$	$Pr \cdot Gr$
1	$Pr \cdot Gr < 10^3$
$\varepsilon_k = 0.105 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.3}$	$10^3 < Pr \cdot Gr < 10^6$
$\varepsilon_k = 0.4 (Gr \cdot Pr)^{0.25}$	$10^6 < Pr \cdot Gr < 10^{10}$

Для горизонтальных труб с диаметром  $D$ , когда  $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^2$

$$Nu = 0.5 (Gr_{\text{жс}} \cdot Pr_{\text{жс}})^{0.25} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad (7.38)$$

⇒ Для вертикальных труб, с высотой -  $H$ , когда  $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$

$$Nu = 0.76 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0.25} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad (7.39)$$

В случае, когда  $Gr \cdot Pr > 10^9$

$$Nu = 0.15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.33} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad (7.40)$$

⇒ В случае Ламинарного режима для расчета используется **Критерий Рейнольдса** -  $Re < 2 \cdot 10^4$ , тогда

$$Nu = 0.66 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad (7.41)$$

⇒ В случае Турбулентного режима для расчета используется **Критерий Рейнольдса**  $Re > 4 \cdot 10^5$ , тогда

$$Nu = 0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad (7.42)$$

⇒ При вынужденном течении жидкости или газа:



$$\text{Re} = \frac{\nu \cdot \ell}{\nu}; \quad (7.43)$$

где  $\nu$  – скорость течения жидкости или газа;  
 $\nu$  – кинематическая вязкость среды.

**Теплоотвод лучеиспусканием** описывается законом Стефана-Больцмана

$$Q_{\text{луч}} = \varepsilon_{\text{луч}} \cdot \sigma_0 \cdot S \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (7.44)$$

где  $\varepsilon_{\text{луч}}$  – коэффициент теплового излучения;  
 $\sigma_0$  – постоянная Больцмана;  
 $S$  – поверхность излучения;  
 $T$  – температура поверхности.

В случае стенки с перепадом температур  $T_1 - T_2$

$$Q_{\text{луч}_{1-2}} = \sigma_0 \cdot S \cdot \varepsilon_{\text{луч}_{\text{прив}}} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (7.45)$$

Величина  $\varepsilon_{\text{луч}}$  зависит от формы и черноты тела. Для цилиндрической стенки

$$\varepsilon_{\text{луч}_{\text{прив}}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{луч}_1}} + \frac{S_1}{S_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{луч}_2}} - 1 \right)} \quad (7.46)$$

при  $S_1 = S_2 = S_i$

$$\varepsilon_{\text{луч}_{\text{прив}}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{луч}_1}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{луч}_2}} - 1} \quad (7.47)$$

В связи с тем, что теплоотвод лучеиспусканием в основном имеет место для сильно нагретых тел, в расчетах ЭИК он может не учитываться.

### **Пример: Тепловой расчет высоковольтного ввода**

Учитывая сложность конструкции проходных изоляторов (вводов) сделаем допущения:

- ⇒ тепловые потоки в аксиальном направлении малы и ими можно пренебречь;
- ⇒ все тепло отводится через верхнюю (воздушную) фарфоровую крышку.

⇒ теплоотвод через нижнюю (масляную) покрывку практически невозможен (для вводов, имеющих масляные концы).

Рассмотрим поперечное сечение ввода (см. рис.7.9).

Исходя из конструкции ввода, можно составить тепловую схему замещения для цилиндрической системы с учетом сделанных допущений.

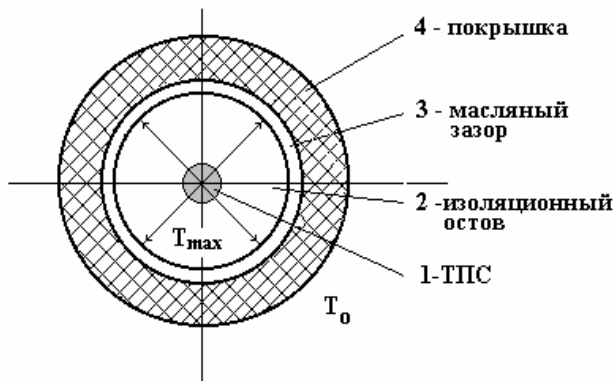


Рис. 7.9. конструкция ввода в поперечном сечении

В отличие от ранее рассмотренной схемы здесь введены емкости  $C_1, C_2$  и т.д., которые указывают на наличие в цепи диэлектрика (рис.7.10)

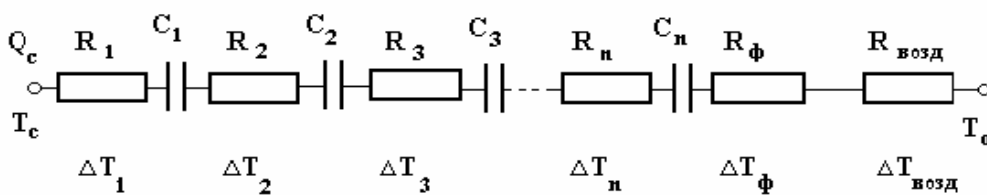


Рис. 7.10

В зависимости от температуры окружающей среды ( $T_0$ ) будет изменяться и температура ТПС ( $T_{ст}$ ).

В соответствии с этой схемой сделаем расчет перепадов температур и тепловыделений на каждом участке (сопротивлении), задавшись несколькими значениями температуры  $T_{ст}$ .

(Рекомендуемые значения  $T_c - 90^{\circ}C, 60^{\circ}C, 30^{\circ}C, 0^{\circ}C$ ).

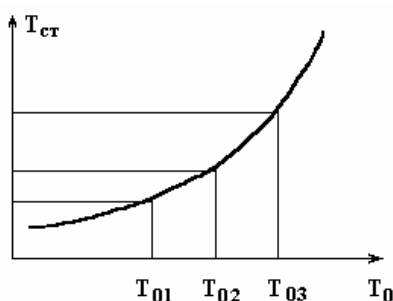


Рис. 7.11. Зависимость температуры ТПС ( $T_{ст}$ ) от температуры окружающей среды ( $T_0$ )

В соответствии с ранее изложенной методикой рассмотрим порядок теплового расчета ввода.

**1. Тепловыделение в стержне:**

$$q_c = I_{ном}^2 \cdot \rho_{20} \cdot \frac{1}{S_c} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_c - 20^\circ)] \quad (7.48)$$

**2. Тепловыделение в слоях изоляции или в масле:**

$$q_{уз_i} = \frac{\Delta U_{i,раб.}^2 \cdot \omega \cdot C_i \cdot tg \delta_i}{\ell_i}, \quad (7.49)$$

здесь:  $\omega$  – угловая частота ( $\omega = 2\pi \cdot f$ );

$C_i$  – емкость слоя (из электрического расчета);

$\ell_i$  – длина обкладки (из электрического расчета);

$tg \delta_i$  – значение  $tg \delta$  с учетом типа изоляции;

- Для бумажно-бакелитовой изоляции:

$$tg \delta = 0.03 \cdot e^{0.02 \cdot (t-20)}$$

- Для бумажно-пропитанной изоляции:

$$tg \delta = \frac{tg \delta_k}{1 + \frac{\varepsilon_k \cdot (\gamma_k - \gamma)}{\varepsilon_{жс} \cdot \gamma}} + \frac{tg \delta_{жс}}{1 + \frac{\varepsilon_{жс} \cdot \gamma}{\varepsilon_k \cdot (\gamma_k - \gamma)}}$$

**3. Перепад температуры в первом слое:**

$$\Delta t_n = \left( q_c + \frac{q_{уз_n}}{2} \right) \cdot \frac{\ln \frac{r_{n-1}}{r_n}}{2\pi \cdot \lambda}; \quad (7.50)$$

**4. Перепад температуры во втором слое:**

$$\Delta t_{n-1} = \left( q_c + q_n + \frac{q_{n-1}}{2} \right) \cdot \frac{\ln \frac{r_{n-2}}{r_{n-1}}}{2\pi \cdot \lambda}; \quad (7.51)$$

$$\text{где: } q_{n-1} = \frac{\Delta U_{n-1}^2 \cdot C_{n-1} \cdot tg \delta_{n-1}}{\ell_{n-1}} \quad (7.52)$$

Значение  $tg \delta_{n-1}$ , берем при температуре  $t_{n-1} = t_c - \Delta t_n$

Аналогично производим расчет в последующих слоях.

**5. Суммарный тепловой поток:**

$$Q = q_0 \cdot \ell_c + \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ell_i \quad [\text{Вт}]; \quad (7.53)$$

Здесь  $\sum_{i=1}^n q_i \cdot \ell_i$  — сумма тепловых потоков по слоям.

Результаты расчета внесем в таблицу 7.4

Таблица 7.4

<i>i</i>	<i>r<sub>b</sub></i> М	<i>l<sub>i</sub></i> М	<i>T<sub>c.1</sub></i>			<i>T<sub>c.2</sub></i>			<i>T<sub>c.3</sub></i>			<i>T<sub>c.4</sub></i>		
			<i>q<sub>b</sub></i> Вт/ М	<i>T<sub>b</sub></i> °С	<i>q<sub>il<sub>i</sub></sub></i> Вт	<i>q<sub>b</sub></i> Вт/ М	<i>T<sub>b</sub></i> °С	<i>q<sub>il<sub>i</sub></sub></i> Вт	<i>q<sub>b</sub></i> Вт/ М	<i>T<sub>b</sub></i> °С	<i>q<sub>il<sub>i</sub></sub></i> Вт	<i>q<sub>b</sub></i> Вт/ М	<i>T<sub>b</sub></i> °С	<i>q<sub>il<sub>i</sub></sub></i> Вт

Полный тепловой поток происходит через масляный зазор у фарфоровой покрышки.

#### 6. Перепад температуры в масляном зазоре

$$\Delta t_m = \frac{Q}{2\pi \cdot \ell_\varepsilon \cdot \lambda_m} \cdot \ln \frac{d}{2 \cdot r_\phi}; \quad (7.54)$$

Здесь: *d* – внутренний диаметр фарфоровой покрышки;  
*r<sub>φ</sub>* – радиус фланца;  
*l<sub>ε</sub>* – длина воздушной части покрышки;  
*λ<sub>м</sub>* – коэффициент теплопроводности масла.

Принимается, что в масле нет теплообмена за счет конвекции.

#### 7. Перепад температуры в фарфоровой покрышке

$$\Delta t_\phi = \frac{Q}{2\pi \ell_\varepsilon \cdot \lambda_\varepsilon} \cdot \ln \frac{D}{d} \quad (7.55)$$

#### 8. Температура на поверхности фарфоровой крышки

$$t_{нов} = t_1 - \Delta t_m - \Delta t_\phi \quad (7.56)$$

$$t_{ос} = t_1 - \Delta t_m - \Delta t_\phi - \Delta t_\varepsilon; \quad (7.57)$$

Здесь *t<sub>1</sub>* – температура слоя изоляции у масляного зазора (из таблицы 7.4).

#### 9. Температуроперепад в воздухе Δ*T<sub>B</sub>*

Для нахождения Δ*T<sub>B</sub>* воспользуемся критериальными представлениями о теплообмене в воздухе.

$$\text{Примем } \Delta t_B = \Delta t_{зад1} = 10^\circ \text{C},$$

$$\text{тогда } t_{01} = t_{нов} - \Delta t_{зад1} \quad (7.58)$$

При этих условиях найдем критерии  $Pr$  и  $Gr$ :

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu}{\frac{\lambda}{C_p \cdot \rho}} \quad (7.59)$$

Здесь:  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $C_p$  – удельная теплоемкость;  
 $\rho$  – плотность среды.

$$Gr = g \cdot \beta \frac{\ell_B^3}{\nu^2} \cdot \Delta t_{зад1}; \quad (7.60)$$

$$\text{где } \beta = \frac{1}{273} \quad [1/^\circ\text{C}]$$

$$Nu = c \cdot (Pr \cdot Gr)^n \quad (7.61)$$

Постоянные  $c$  и  $n$  найдем из таблицы 7.5 в зависимости от произведения  $Gr \cdot Pr$

Таблица 7.5

$Gr \cdot Pr$	$c$	$N$
$10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-2}$	1, 18	1/8
$5 \cdot 10^{-2} \div 2 \cdot 10^7$	0, 54	1/4
$2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^{13}$	0, 135	1/3

### 10. Коэффициент теплоотдачи с поверхности

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{\ell_B}; \quad (7.62)$$

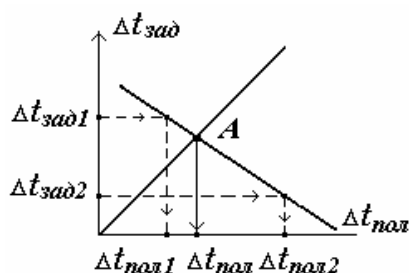
Температуроперепад

$$\Delta t_{пол1} = \frac{Q}{\alpha_K \cdot S}; \quad (7.63)$$

Здесь  $S$  – поверхность внешней фарфоровой крышки без учета ребер.

Задаемся другим значением  $\Delta t_{зад2}$  и, повторяя расчет, находим  $\Delta t_{пол2}$ .

Строим график и находим  $\Delta t_{пол}$  в точке пересечения прямых (см. рис.7.12)



Зная  $\Delta t_{пол} = \Delta t_B$ , найдем  $t_0$ :

$$t_{01} = t_1 - \Delta t_M - \Delta t_\Phi - \Delta t_B$$

Рис.7.12

(6.65)

**11. Задаемся другой температурой  $T_c$  и повторяем расчеты согласно изложенного порядка.**

**12. Зная  $T_{c1}, T_{c2}, T_{c3}, T_{c4}$  и  $T_{01}, T_{02}, T_{03}, T_{04}$ , строим график зависимости  $T_c = f(T_0)$ , показанный на рис. 7.13.**

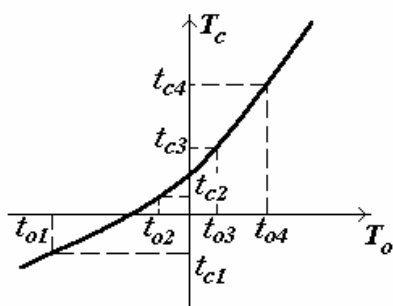


Рис. 7.13

Исходя из этой зависимости и находя и справочника величину  $T_{дон}$  для выбранной изоляции, находим  $T_{0c}$ . Эта температура должна соответствовать температурным условиям работы ввода ( $T_{max} \div T_{min}$ ). Если это не так, то производится корректировка конструкции или повторяется расчет при других параметрах изоляции.

### Пример 2. Особенности теплового расчета вводов с маслобарьерной изоляцией

Теплоотвод внутри ввода с маслобарьерной изоляцией во многом определяется количеством, размерами масляных каналов и циркуляцией в них масла. Поэтому их точный тепловой расчет затруднен.

Для упрощения расчетов можно сделать следующие допущения:

- ⇒ наличие барьеров не оказывает существенного влияния на тепловыделение и их можно не учитывать в расчете;
- ⇒ полость между подмоткой бумажной изоляции по стержню и внутренней поверхностью фарфоровой крышки будем принимать за один масляный канал.

Проводим расчет в следующей последовательности:

1. Задаемся температурой стержня  $T_c$  и находим  $q_c$  по аналогии с предыдущим примером.
2. Тепловыделение в бумажной подмотке на стержне при  $T_{c1}$ :

$$P_{\delta 11} = \Delta U_{11}^2 \cdot \omega \cdot C_{11} \cdot \operatorname{tg} \delta_1 \cdot \ell_1 [\text{Вт}] \quad (7.65)$$

где  $tg\delta_l$  находим при температуре  $t_{c1}$ .

3. Находим перепад температур в слое подмотке

$$\Delta t_{\delta_{нод}} = t_{c1} - t_{нод} = \left( q_c \cdot \ell_c + \frac{P_{11}}{2} \right) \cdot \frac{\ln \frac{r_{12}}{r_{11}}}{2\pi \cdot \lambda \cdot \ell_{cm}}. \quad (7.66)$$

Здесь:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности бумажной подмотки;  
 $l$  – длина подмотки (стержня).

$$t_{нов,нод} = t_{c1} - \Delta t_{\delta_{1нод}} \quad (7.67)$$

Исходя из сделанных допущений, считаем температуру внутри масляных каналов одинаковой, тогда общее тепловыделение:

$$P_{\delta} = \sum_{i=1}^{n=4} \Delta U_{ij}^2 \cdot \omega \cdot C_{ij} \cdot \ell_{ij} \cdot tg \delta_{t_{нод}} \quad (7.68)$$

4. Определяем эквивалентный коэффициент теплопроводности масляного канала:

$$\lambda_{экр} = \lambda_M \cdot \varepsilon_K; \quad (7.69)$$

Здесь:  $\lambda_M$  – коэффициент теплопроводности масла;  
 $\varepsilon_K$  – коэффициент, учитывающий конвекцию.

5. Находим значения  $Pr$  и  $Gr$  при  $T = t_{нод}$

6. Определяем перепад температуры в масле:

$$\Delta t_{вн} = t_{нод} - t_{ф.вн} = \left( q_c \cdot \ell_c + \frac{P_{\delta}}{2} \right) \cdot \frac{\ln \frac{r_{1вн}}{r_{12}}}{2\pi \cdot \lambda_{\omega} \cdot \ell_{\omega}} \quad (7.70)$$

$$\Delta t_{\phi} = \frac{Q}{2\pi \cdot \lambda_{\omega} \cdot \ell_{\omega}} \cdot \ln \frac{r_{\phi.нар}}{r_{1вн}} \quad (7.71)$$

Здесь:  $Q = q_c \cdot \ell_c + P_{\delta}$

$$t_{\phi.нар} = t_{c1} - \Delta t_{\delta_{нод1}} - \Delta t_{вн1} - \Delta t_{\phi1}. \quad (7.72)$$

7. Перепад температуры в окружающую среду находим как  $\Delta t_{пол}$  по изложенной выше методике в примере 1. Тогда:

$$t_{01} = t_{c1} - \Delta t_{нод1} - \Delta t_{вн1} - \Delta t_{\phi1} - \Delta t_{пол1} \quad (7.73)$$

8. Производим аналогичные расчеты при других температурах  $t_{c2}$ ,  $t_{c3}$ , и  $t_{c4}$ . Строим график  $T_c = f(T_{0C})$  и находим  $T_{допуст}$ . Проводим проверку тепловой устойчивости ввода.

## Глава 8. Основы механического и конструктивного расчета ЭИК

### 8.1. Механический расчет

В реальных условиях ЭИК кроме электрической нагрузки подвергаются воздействию различных видов механической нагрузки, как внешней, так и внутренней (электродинамические силы, внутренние механические напряжения и т.д.). Обеспечение механической устойчивости конструктивных элементов, токоведущей жилы кабеля, токопроводящего стержня ввода, обмотки трансформатора или электродвигателя и т.д. в процессе работы является одним из обязательных условий обеспечения надежности ЭИК.

Проведение механического расчета зависит от особенностей конструкции и вида воздействующих нагрузок.

*Рассмотрим это на примере высоковольтного ввода.*

Исходя из особенностей конструкции высоковольтного ввода, можно выделить:

- ⇒ а) механический расчет фарфоровой покрышки;
- ⇒ б) расчет узла крепления покрышки к фланцу и к корпусу ЭИК;
- ⇒ в) расчет токопроводящего стержня.

#### 8.1.1. Расчет фарфоровой покрышки

В процессе работы фарфоровая покрышка подвергается действию ветра, гололеда, изгибу от сил натяжения проводов или шин, электродинамических сил и др. Наиболее опасным сечением покрышки является место ее соединения с фланцем. Рассмотрим эскиз ввода (см. рис.8.1).

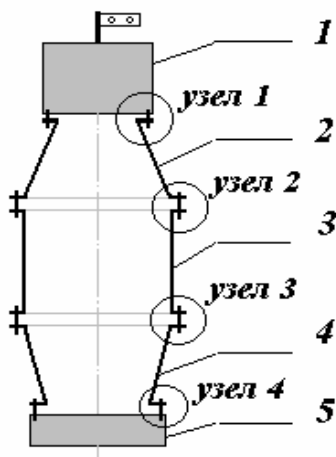


Рис.8.1. Эскиз ввода

- 1 - масло расширитель
- 2 - верхняя покрышка
- 3 - фланец
- 4 - нижняя покрышка
- 5 - стакан



Рассмотрим узел 2 – узел крепления фарфоровой покрышки к фланцу (см. рис.8.1). Именно на данный узел приходится наибольшая нагрузка от действующих сил на изолятор в процессе работы.

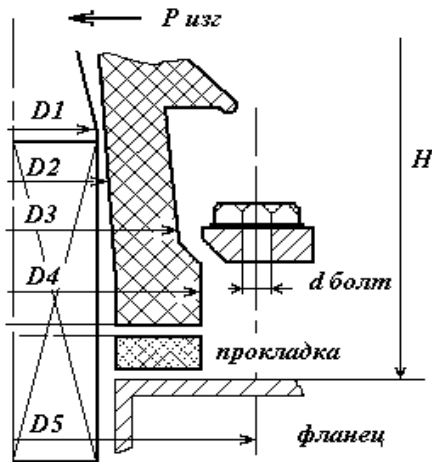


Рис. 8.2 (Узел 2)

- D1 – наружный диаметр изоляционного остова;  
 D2 – внутренний диаметр покрышки;  
 D3 – наружный диаметр покрышки;  
 D4 – наружный диаметр покрышки под прокладку;  
 D5 – диаметр расположения оси болтов.

1. Выберем технологический зазор между изоляционным остовом и фарфоровой покрышкой ( $\Delta_{\text{заз}}=5\div 20$  [мм]). Тогда внутренний диаметр

$$D_2 = 2(r_{\phi} + \Delta_{\text{заз}}) \quad (8.1)$$

2. Задаваясь толщиной фарфоровой покрышки ( $\Delta_{\phi}= 10\div 30$  [мм]) найдем ее наружный диаметр

$$D_3 = D_2 + 2 \cdot \Delta_{\phi} \text{, [м]} \quad (8.2)$$

3. Момент сопротивления изгибу (для цилиндрического тела)

$$W = \frac{2\pi(D_3^4 - D_2^4)}{64 D_3} \text{, [м}^3\text{]} \quad (8.3)$$

4. Расстояние от точки приложения силы до опасного сечения равно

$$H = l_{\text{сxp}} + \Delta l \approx l_{\text{сxp}} + 0,1 l_{\text{сxp}} \text{, [м]} \quad (8.4)$$

Здесь  $\Delta l$  – удлинение на высоту масло расширителя и размер экрана.

5. Найдем изгибающий момент

$$M_{\text{изг}} = P_{\text{изг}} \cdot H = \kappa \cdot P_{\text{раб}} \cdot H \text{, [н]} \quad (8.5)$$

Здесь  $\kappa = (2\div 2,8)$  – коэффициент запаса, учитывающий возможные

перегрузки. Величина  $P_{изг}$  определяется из условия

$$P_{изг} = \kappa_1 \kappa_2 P_{раб}, \quad P_{изг} = \kappa_2 P_{исп}, \quad P_{исп} = \kappa_1 P_{раб}$$

где:  $\kappa_1 = (1,5 \div 2,2)$ ;  $\kappa_2 = (1,5 \div 2,5)$

6. Напряжение изгиба найдем

$$\sigma = \frac{M_{изг}}{W} \leq [\sigma_{изг доп}] \quad (8.6)$$

Величина  $[\sigma_{изг доп}]$  может быть найдена из графика зависимости  $\sigma_{изг} = f(S)$  для фарфора (см. рис.8.3) или рассчитана по эмпирическому уравнению

$$[\sigma_{доп_{изг}}] = e^{2/7} e^{-0/24S} \quad (8.7)$$

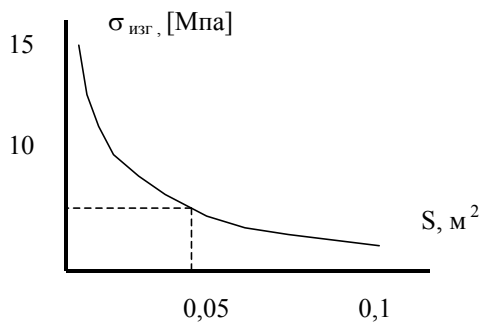


Рис.8.3. Зависимость прочности фарфора на изгиб от сечения тела.

В реальных условиях при оценке механической прочности фарфоровой покрышки необходимо учитывать также усилия на срез (кручение), возникающие в цементной заделке или узле крепления на фланце.

### 8.1.2. Расчет узла крепления покрышки и фланца к корпусу

Различают следующие способы крепления:

1. С помощью цементной заделки.
2. С помощью съёмного кольца.
3. С помощью стягивающих пружин.

#### 1. Крепление с помощью цементной заделки

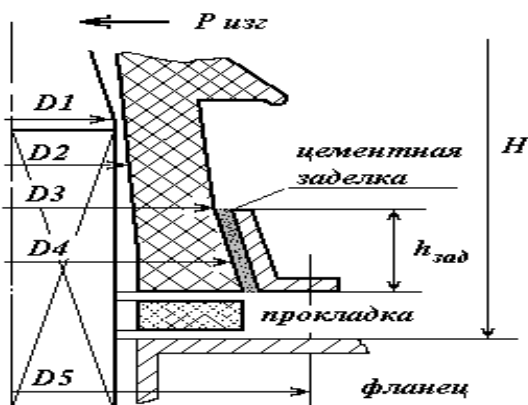


Рис.8.4. Крепление фарфоровой покрышки к фланцу с помощью цементной заделки (узел 2)

Взаимосвязь между прочностью на разрыв и прочностью на срез описывается уравнением

$$\sigma_{изг} = \frac{24 P_{изг} \left( H - \frac{h_{зад}}{3} \right)}{\pi d h_{зад}^2} - \tau \left( 1 + \frac{6d}{h_{зад}} \right) \leq [\sigma_{изг доп}], [\text{Н/м}^2] \quad (8.8)$$

Находя  $\sigma_{изг}$  при  $\tau_k = 0$  и  $\tau_k$  при  $\sigma_{изг} = 0$ , можно построить кривую  $\sigma_{изг} = f(\tau_k)$ , определяющую область допустимых значений (рис. 8.5).

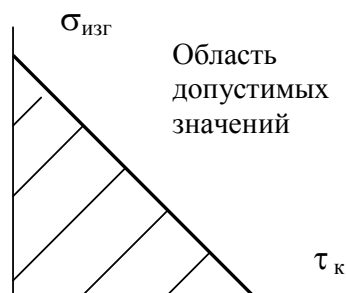


Рис.8.5. Взаимосвязь прочности на изгиб и на кручение (срез) для фарфора

Решая данное уравнение относительно  $h_{зад}$  при найденном значении  $\sigma_{изг}$  определим высоту цементной заделки.

## 2. Крепление покрышки с помощью съемного кольца

В целях обеспечения герметичности ввода при эксплуатации, а также защиты фарфоровой покрышки от сколов при монтаже применяют эластичные прокладки из электрокартона, резины и др. материалов. Поэтому расчет узла крепления производится из условия **прочности прокладок на смятие**.

Из рис.8.2 для узла 2 следует, что наружный диаметр прокладки равен:

$$D_4 = D_3 + 2\Delta_{np} \quad (8.9)$$

Здесь  $\Delta_{np}$  - утолщение фарфоровой покрышки под прокладку ( $\Delta_{np} = 5 \div 10$  [мм]).

Тогда площадь прокладки:

$$S_{np} = \frac{\pi}{4}(D_4^2 - D_2^2) \quad (8.10)$$

Момент сопротивления прокладки

$$W_{np} = \frac{2\pi(D_4^4 - D_2^4)}{64D_4}, \text{ отсюда} \quad (8.11)$$

$$\sigma_{см} = \frac{M}{W_{np}} \leq [\sigma_{см.дон}] \quad (8.12)$$

для резины  $\sigma_{см} = (1 \div 2)$  [Мпа]

для паронита  $\sigma_{см} = (3 \div 3,5)$  [Мпа]

для эл.картона  $\sigma_{см} = (3,5 \div 4,5)$  [Мпа]

### 3. Расчет болтового крепления

Все элементы конструкции соединяются друг с другом тем или иным способом для обеспечения герметичности ввода. Наиболее распространенным и простым способом является болтовое крепление. В наиболее нагруженном состоянии находится болтовое крепление верхней фарфоровой крышки к фланцу (рис.8.2 узел 2).

Независимо от способа крепления крышки к фланцу, нагрузка на болты, соединяющие фланец к корпусу аппарата будет складываться из усилия изгибающей нагрузки на изолятор и усилия затяжки гаек при сборке.

$$F = F_{изг} + F_{зат} \quad (8.13)$$

Здесь  $F_{зат}$  - усилие затяжки, определяемое из условия продавливания прокладки

$$F_{зат} = \sigma_{смдон} \cdot S_{np}, \text{ где} \quad (8.14)$$

$$S_{np} = \frac{\pi}{4}(D_4^2 - D_2^2)$$

Усилие от изгибающей нагрузки найдем

$$F_{изг} = \frac{M_{изг}}{D_5} \quad (8.15)$$

Здесь  $D_5$  - диаметр расположения болтов

$$D_5 = D_4 + 2\left(\frac{d_{бол}}{2} + \Delta\right), \text{ где} \quad (8.16)$$

$d_{бол}$  - диаметр болта с учетом резьбы;

$\Delta$  - технологический зазор ( $\Delta = 5 \div 20$ [мм]), необходимый для размещения гайки.

Задавая диаметр болта и их количество можно найти

$$S_{бол} = n \frac{\pi d_{бол}^2}{4}, \quad (8.17)$$

где  $n$  - число болтов (обычно выбирается четное число-4;6;..10...),  
 $d_{бол}$  - диаметр болта с учетом резьбы.

Отсюда:

$$\sigma_{раст.б} = \frac{F}{S_{бол}} \leq [\sigma_{раст}]_{доп} \quad (8.18)$$

В качестве материала болтов используется конструкционная сталь марок:

Ст3  $\sigma = (300 \div 330)$  [Мпа]

Ст30  $\sigma = (330 \div 350)$  [Мпа]

Ст40  $\sigma = (350 \div 400)$  [Мпа]

#### 4. Крепление покрышек с помощью пружины

Пружины бывают двух видов (рис.8.6)

1. Тарельчатые.
2. Цилиндрические (витые).

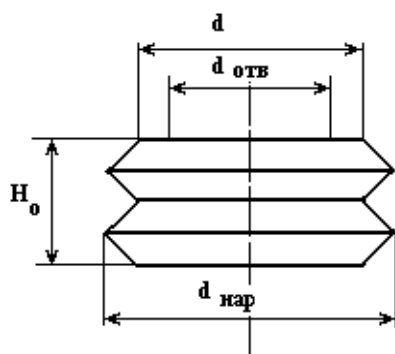


Рис.8.6 (а) Тарельчатая пружина

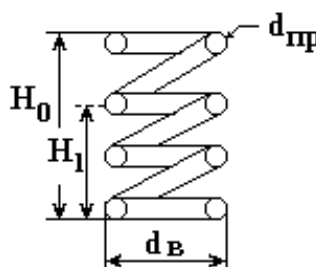


Рис.8.6 (б). Витая пружина

Это один из способов, обеспечивающих герметичность конструкции при соединении всех элементов в/в вводов. Недостаток – большая нагрузка на ТПС, который работает на растяжение.

#### **Рассмотрим пример расчета цилиндрических витых пружин.**

Пружины располагают в маслорасширителе концентрически относительно его оси. Количество пружин берется равным 1, 3, 4, 6, 8, 10 и т.д.

Ход пружины при эксплуатации обусловлен тепловым расширением токопроводящего стержня и фарфоровых покрышек.

$$\Delta l = 1,2 \cdot l_{ст} \alpha_{ст} (t_{max} - t_{min}), \quad (8.19)$$

где  $\alpha_{ст}$  - коэффициент линейного расширения,

$t_{max}, t_{min}$  - пределы температуры с учетом  $t_{oc}$ .

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S} \leq [\sigma_{сж.пр}]_{доп}, \quad (8.20)$$

где  $[\sigma_{сж}]_{доп} = (1 \div 1,25) [\text{кг/мм}^2]$ , отсюда

$$P_{пруж} = S \cdot \sigma_{сж} \quad (8.21)$$

Усилие на 1 пружину

$$F_1 = \frac{P_{пруж}}{n} \quad (8.22)$$

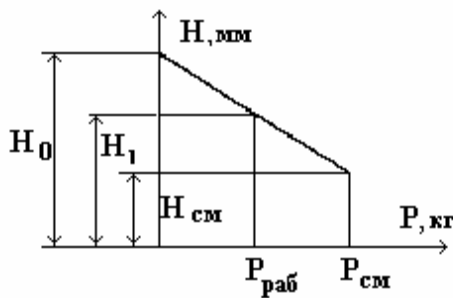


Рис. 8.7.

Зная  $F_1$  и  $\Delta l$ , по справочнику выбирается размер пружин и их количество (ГОСТ 13772-68). Для обеспечения герметичности ввода пружины должны находиться в напряженном состоянии при  $T_{min}$ , т.е. под нагрузкой  $\approx 0,3 F_{раст}$ .

На рис.8.7 это соответствует нагрузке  $P_{раб}$ .

## 5. Механический расчет ТПС

При расчете пружины нужно учитывать механическую прочность токопроводящего стержня (ТПС) на разрыв, т. е.

$$F_{раст} \cdot S_{см} = \sigma_{раст} \leq [\sigma_{доп}], \quad (8.23)$$

где  $S_{см} = \pi(r_{см} - \Delta)^2$ ,

В случае трубы

$$S_{см} = \pi[(r_{см} - \Delta)^2 - r_{вн}^2] \quad (8.24)$$

Здесь  $\Delta$  - поправка на уменьшение сечения стержня за счет резьбы.

## 8.2. Конструктивные расчеты

Конструктивные расчеты высоковольтных вводов включают в себя определение числа и размеров ребер, расчет маслорасширителя, экранов, ПИН и др. элементов.

### 8.2.1. Расчет и конструирование ребер

Для повышения разрядного напряжения внешней изоляции высоковольтных вводов, фарфоровая покрывка выполняется с ребрами. На величину выдерживаемого напряжения под дождем ( $U_\delta$ ) влияет общая длина сухих участков поверхности изолятора, остающаяся под ребрами. Ее величина зависит от вылета ребра, расстояния между ребрами, угла наклона и числа ребер.

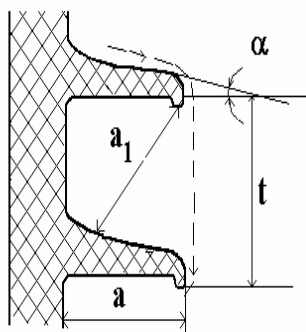


Рис. 8.8. Конструкция ребер фарфоровой покрывки

При увеличении вылета ребра длина сухих участков увеличивается, что приводит к росту выдерживаемого напряжения  $U_\delta$ .

Когда вылет ребра  $a$  становится равным или больше половины расстояния между ребрами  $t$ , разряд отрывается от поверхности и идет по воздуху. В этом случае рост  $U_\delta$  прекращается. Таким образом, выгодно выбирать отношение

$$\frac{a}{t} = 0,5 \div 0,8 \quad (8.25)$$

Для работы в загрязненных районах это отношение увеличивают, чтобы уменьшить загрязняемость ребер.

Наилучший угол  $\alpha$  лежит в пределах  $15 \div 26^\circ$ . При больших углах наклона происходит снижение  $U_\delta$  из-за уменьшения разрядного расстояния между ребрами.

При малых углах наклона облегчается оседание пыли и возрастает вероятность попадания брызг дождя на нижнюю поверхность ребер.

Количество ребер найдем:

$$N = 1,5 + 0,065 U_n \quad (8.26)$$

С учетом вышесказанного выбирают

$$t = l_c / N, \quad a = 0,5 t \quad (8.27)$$

Тогда

$$L_{расч} = l_{уд} U_{раб} \quad (8.28)$$

где  $l_{уд} = (3,6 \div 1,7)$ , [см/кв].

Построив эскиз изолятора, уточняют расчетное значение  $U_\delta$

$$U_{\partial} = 3,78 l_{cpr}^{0,77} + \frac{2,82 N \cdot t^{0,6} a_1}{a} > U_{\partial.гост} \quad (8.29)$$

Здесь:  $k = (3,78 - 2,82)$  - коэффициенты при силе дождя 3 мм/мин;  
 $l_{cpr}, t, a$  - в [см]

Для нижней крышки, работающей в масле, ребра обычно не делают, или делают полукруглой формы. При этом, чтобы избежать оседания на них загрязнений, для повышения разрядного напряжения увеличивают расстояние между ребрами в  $(1,5 \div 2)$  по сравнению с воздушной частью, т.е.  $t = a$ .

Высота или вылет ребра принимается равной толщине стенки фарфоровой крышки, т.е.  $a = \Delta_{\phi}$ .

### 8.2.2. Расчет маслорасширителя

Маслорасширитель или бак давления служат для компенсации теплового расширения масла при изменении температурного режима.

Различают:

1. Открытые (негерметичные).
2. Герметичные.
3. С фильтрацией и осушкой воздуха.
4. Баки давления.

Открытые (негерметичные) маслорасширители имеют непосредственный контакт масла с атмосферным воздухом, что не исключает загрязнение и увлажнение масла за счет поглощения пыли, влаги и др. компонентов, содержащихся в воздухе. Обычно такие маслорасширители применяют в изоляторах или вводах на напряжение не выше 110 кВ.

В маслорасширителях с фильтрацией и осушкой воздуха воздух может поступать в него только через фильтры или специальные адсорбенты.



Рис. 8.9. Конструкция маслорасширителя с фильтром.

Однако, и в этом случае, взаимодействие воздуха с маслом не исключает окисления масла кислородом воздуха и постепенное его загрязнение продук-



тами распада. Этот недостаток исключается при использовании маслорасширителей герметичной конструкции, в которых для компенсации теплового расширения масла применяют специальные компенсирующие элементы (сильфоны, диафрагмы), размещенные в самом маслорасширителе или в специальном баке давления.

Конструктивно маслорасширители могут выполняться как одно целое с изолятором и обычно располагаются в верхней его части или выносными, расположенными отдельно от изолятора. Такое расположение маслорасширителя или бака давления, как правило, используется для вводов, устанавливаемых в аппаратах горизонтально.

При конструировании маслорасширителя необходимо выполнять следующие условия:

1. Исключить попадание влаги;
2. Исключить попадание загрязнений;
3. Защитить масло от прямого попадания света;
4. Предусмотреть устройство для отбора проб масла и его контроля;
5. Обеспечить возможность постоянного визуального контроля уровня масла без отключения изолятора;
6. Иметь запас свободного объема на случай аварийного перегрева масла в изоляторе.

Необходимый обменный объем маслорасширителя зависит от колебаний температуры и определяется:

$$\Delta V = V_m \alpha_m (T_{\max} - T_{\min}), \quad (8.30)$$

здесь  $V_m$  - объем масла в изоляторе;

$\alpha_m$  - температурный коэффициент объемного расширения масла  
( $6,6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ );

$T_{\max}, T_{\min}$  - максимальная и минимальная температуры изолятора.

Минимальная температура изолятора принимается равной минимальной температуре окружающей среды по условиям эксплуатации (для изолятора в отключенном состоянии).

Максимальная температура изолятора подсчитывается как сумма максимальной температуры окружающей среды и наибольшего суммарного температуроперепада, т.е. берется равной допустимой температуре перегрева из теплового расчета.

Объем масла в изоляторе определяется:

$$V_m = V_n - V_m + V_\delta \alpha_n \quad (8.31)$$

Здесь  $V_n$  - объём внутренней полости изолятора

$$V_n = V_{nc} + V_{nk1} + V_{nk2}, \quad (8.32)$$

$V_m$  - объем, занимаемый изоляционным остовом, включая бумажнобаке-литовые цилиндры, бумагу, различные рейки, прокладки и др. конструк-ционные элементы

$$V_m = V_{mц} + V_{mk1} + V_{mk2}, \quad (8.33)$$

$V_б$  - объем масла, находящийся в изоляции при пропитке,

$\alpha_n$  - коэффициент пропитки бумаги

$$\alpha_n = \frac{(\gamma_k - \gamma_б)}{\gamma_k} = 0,1; \quad \gamma_k = 1,55; \quad \gamma_б = 1,3. \quad (8.34)$$

Здесь  $\gamma_k$ ,  $\gamma_б$  - соответственно плотность клетчатки и бумаги.

В конструктивном исполнении маслорасширители выполняются одно-камерными и многокамерными и изготавливаются либо стеклянными, либо металличе-скими. Стеклянные маслорасширители удобны для визуального кон-троля за уровнем масла, но не обеспечивают защиту от воздействия солнеч-ных лучей и хрупкие.

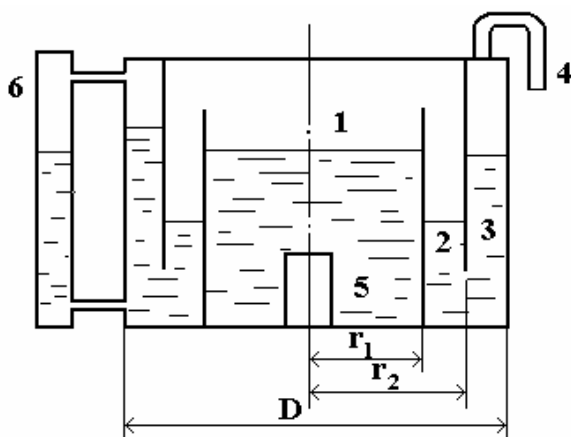


Рис. 8.10. Конструкция мас-лорасширителя.

1,2,3 - камеры;

4 - дыхательная трубка;

5 - соединительная трубка;

6 - мерное стекло.

Поэтому, наибольшее распространение получили металлические расши-рители, которые обычно выполняются цилиндрической формы. С учетом требований к маслорасширителям они выполняются в многокамерном ис-полнении, чтобы устранить непосредственный контакт масла с воздухом (см. рис. 8.10).

Как уже отмечалось, для создания необходимого свободного объема маслорасширителя, его принимают равным двукратному обменному объему, т.е. задавшись диаметром  $D$  найдем его высоту.

$$H = \frac{8\Delta V}{\pi D^2} \quad (8.35)$$

Объем первой камеры с учетом аварийного сброса масла берем с 1.5 кратным увеличением, тогда задавшись  $r_1$ , найдем ее высоту.

$$h_1 = \frac{1,5 \Delta V}{\pi r_1^2}. \quad (8.36)$$

Приняв средний уровень масла во всех камерах одинаковым, т.е.  $h_1=h_2=h_3$ , найдем:

$$\begin{aligned} r_2 &= 1,414 r_1 \\ r_3 &= 1,732 r_1 \end{aligned} \quad (8.37)$$

При проектировании маслорасширителей герметичного исполнения необходимо выбрать компенсирующие элементы - сиффоны и сделать расчет их количества.

Часто сиффоны имеют форму в виде гармошки (см. рис.8.11).

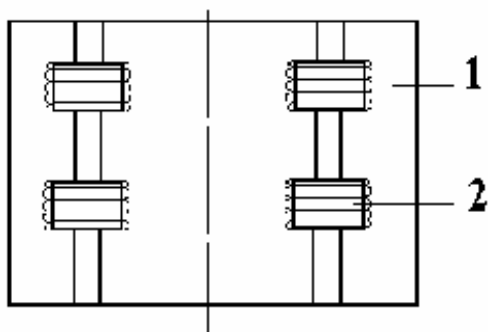


Рис. 8.11. Конструкция сиффонов.

1-бак маслорасширителя;  
2-сиффоны.

При расчете сиффонов исходят из законов газового состояния, пренебрегая упругостью материалов, из которых изготовлены сиффоны.

$$PV = \nu RT, \quad (8.38)$$

где  $P$  - давление газа,  
 $V$  - объем газа,  
 $\nu$  - число молей газа в данном объеме,  
 $R$  - газовая постоянная,  
 $T$  - температура.

$$\begin{aligned} V_{\max} &= n \nu R \frac{T_{\min}}{P_{\min}}; \\ V_{\min} &= n \nu R \frac{T_{\max}}{P_{\max}} \end{aligned} \quad (8.39)$$

где  $n$  - число компенсирующих элементов.

$$\begin{aligned} \Delta V_2 &= V_{\max} - V_{\min} = n \nu R \frac{T_{\min}}{P_{\min}} - n \nu R \frac{T_{\max}}{P_{\max}} \\ &= n \nu R \frac{T_{\min} P_{\max} - T_{\max} P_{\min}}{P_{\min} P_{\max}} \end{aligned} \quad (8.40)$$

При равновесии системы  $\Delta V_2 = \Delta V_m$ .

Решая совместно, найдем

$$n = \frac{V_m \alpha_m (T_{\max} - T_{\min}) P_{\min} P_{\max}}{\nu R (T_{\min} P_{\max} - T_{\max} P_{\min})}; \quad (8.41)$$

$$\nu = \frac{P_{зк} V_{зк}}{RT_{зк}}, \quad (8.42)$$

где  $P_{зк}$ ,  $T_{зк}$ ,  $R_{зк}$  - соответственно давление, температура и объем газа в сильфоне, определяемые его конструкцией.

$$\text{Приняв } K = \frac{T_{зк}}{P_{зк} V_{зк}}, \quad (8.43)$$

найдем:

$$P_{\max} = \frac{T_{\max} P_{\min} n}{[T_{\min} n - K P_{\min} V_m \alpha_m (T_{\max} - T_{\min})]}. \quad (8.44)$$

Аналогично:

$$P_x = \frac{T_x P_{\min} n}{[T_{\min} n - K P_{\min} V_m \alpha_m (T_{\max} - T_{\min})]}. \quad (8.45)$$

Исходя из этого, можно построить график (рис.8.12)

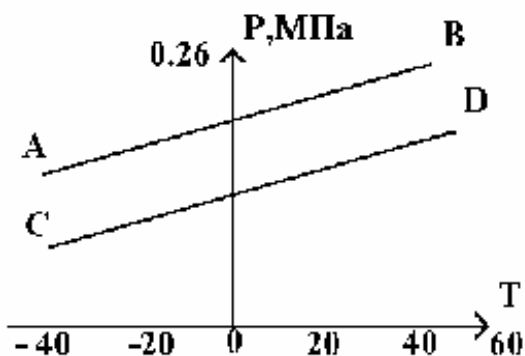


Рис.8.12. Зависимость давления в сильфонах от температуры.  
АВ- верхний предел изменения давления.  
СД- установочная кривая.

Следует отметить, что использование маслорасширителей сильфонного типа или с баком давления приемлемо для вводов с твердой изоляцией, где масло играет только теплоотводящую роль. Если масло служит еще и как изолирующая среда, для пропитки бумажной изоляции, то за счет наличия избыточного давления изменяется растворимость газа в масле и, следовательно, и свойства масла.

### 8.2.3. Расчет экранов

Экраны устанавливаются на верхний и средние фланцы и служат для выравнивания электрического поля с целью предотвращения развития коронных разрядов (см. рис.8.13.).

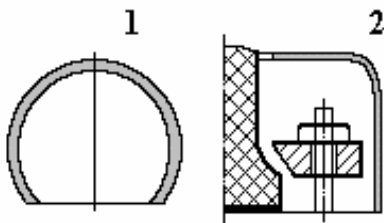


Рис. 8.13. Конструкция экрана  
1. на верхний фланец  
2. на средний фланец

Шаровой экран –1 (рис.8.13) соответствует системе электродов шар–плоскость и устанавливается на верхний фланец, у которого

$$E_{\max} = \frac{U}{R \left(1 - \frac{R}{2H}\right)} \left[1 + 3 \left(\frac{R}{2H}\right)^2\right], \quad (8.46)$$

где  $H = l_e + R$  ;

$$U = U_{\phi} = \frac{U_{\text{раб}}}{\sqrt{3}}; \quad (8.47)$$

$$E_{\text{крит}} = 1,65 m \delta \left[ \frac{0,13}{(\delta R)^{0,38}} \right], \quad (8.48)$$

где  $m$  - коэффициент гладкости,  $m = (0,6-0,8)$ ;

$\delta$  - относительная плотность воздуха

$$\delta = \frac{PT_0}{P_0T}; \quad \delta = \frac{2,89 \cdot 10^{-5} P}{T}, \quad \text{где} \quad (8.49)$$

$P$  – давление, [Па];

$T$  – температура, [°K]

Для высокогорных районов  $\delta = (1,01 - 0,0875) h$ ,  
где  $h$  - высота над уровнем моря (км), если изолятор устанавливается в горах.

Для расчетов  $E_{max} = E_{кр}$ , получаем одно уравнение с неизвестным  $R$ , которое можно найти графически (рис. 8.14).

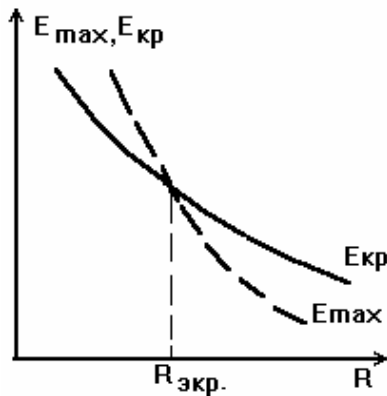


Рис. 8.14

$$R_{экр} = \frac{1,2 U_{раб}}{E_{дон}};$$

$$E_{дон} = 21,2 \delta; \quad (8.50)$$

$$\delta = \frac{0,386 - P}{273 + t}$$

Здесь  $E_{дон}$  выбирается из условия короны.

Для торроидального экрана напряжение появления коронного разряда рассчитывается:

$$U_{кор} = \frac{r E_{кр}}{1 + \left(\frac{r}{2R}\right) \ln\left(\frac{8R}{r}\right)} \left[ \ln\left(\frac{8R}{r}\right) - \left(\frac{\pi R}{2H}\right) \right], \quad (8.51)$$

где  $r$  - радиус трубы торроида,

$R$  - радиус оси торроида,

$H$  - расстояние от оси торроида до заземления части фланца.

$$\text{Здесь } E_{кр} = 1,65 m \delta \left[ 1 + \frac{0,108}{\delta^{0,3} r^{0,38}} \right]. \quad (8.52)$$

Наибольшее значение напряжения появления короны у торроида имеет место при  $R/r = 6,25$ .

Отсюда найдем:

$$U_{кр} = r E_{кр} (0,296 - 0,742 r/H) \quad (8.53)$$

Из уравнения 8.53 определим  $r$ , а затем найдем  $R_{экр}$  из 8.51.

#### 8.2.4. Расчет ПИН (приспособления для измерения напряжения)

Для расчета ПИН необходимо знать соотношение  $C_2$  и  $C_1$ , которое может задаваться в техническом задании или определяться по ГОСТ 10693-74.

Класс Напряжения, кВ	110	150	220	330	500	750
$C_2/C_1$	16	22	33	48	72	120

Емкость изоляционного сердечника:

$$C_1 = \frac{55,5\varepsilon(\ell_1 + \ell_n)}{2 \sum \ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right)}, [нф]; \quad (8.54)$$

$$\frac{\ell_1 + \ell_n}{2} \quad - \text{средняя длина обкладки, [м].}$$

$$\text{Тогда: } C_2 = n_I C_1 \quad (8.55)$$

Фактически значение емкости  $C_2$  принимают на 15÷20% меньше полученного, т.е.

$$C_{2\text{расч}} = (0,8 \div 0,85) C_2 \quad (8.56)$$

Радиус обкладки измерительного устройства  $C_2$  находим из уравнения.

$$C_{2\text{расч}} = \frac{55,5\varepsilon\ell}{\ln\left(\frac{r_n}{r_x}\right)} = \frac{24,1\varepsilon\ell}{\ln\left(\frac{r_n}{r_x}\right)} \quad (8.57)$$

Отсюда находим  $r_x$ .

Толщина изоляционного слоя измерительного конденсатора

$$\delta_k = r_n - r_x, \quad (8.58)$$

а длина измерительной обкладки

$$l_k = l_n + \lambda_m + \lambda_g, \quad (8.59)$$

Здесь  $\lambda_m, \lambda_g$  – длина уступа воздушной и масляной части.

Проверка измерительного конденсатора делается из условия устранения возможности развития скользящего разряда, т.е.

$$U_2 \leq U_{ск}. \quad (8.60)$$

Напряжение, приложенное к обкладкам измерительного конденсатора при последовательном соединении, найдем:

$$U_1 C_1 = U_2 C_2 = const, \text{ т.е.} \quad (8.61)$$

$$U_2 = \frac{U_{расч} \cdot C}{C_2}, \quad (8.62)$$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (8.63)$$

Условие  $U_2 \leq U_{ск}$  примет вид

$$\frac{U_{расч} C_1}{C_1 + C_2} \leq 10^4 a \sqrt{\frac{r_n \ln \frac{r_n}{r_{n+1}}}{\varepsilon}} \quad (8.64)$$

Условие работы измерительного конденсатора предполагает отсутствие частичных разрядов, т.е.

$$E_2 \leq 89,6 \cdot 10^3 \delta^{-0,55} \quad (8.65)$$

## Глава 9. Расчет надежности ЭИК

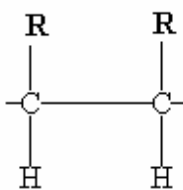
Как уже отмечалось, время жизни ЭИ или долговечность ЭИК зависит от воздействующих нагрузок и других факторов, т.е.

$$\tau = f(E, T, \sigma \dots) \quad (9.1)$$

По этой причине механизм старения ЭИ очень многогранен и сложен, что затрудняет разработку какой то обобщенной модели, описывающей процесс старения.

В настоящее время считается, что одним из возможных и наиболее вероятных механизмов является процесс разрушения материала вследствие разрыва межатомных химических связей при тепловых колебаниях атомов, т.е. тепловых флуктуаций. Такой механизм хорошо описывает закономерности механического разрушения материалов (теория Журкова) и может быть применен также для описания механизма электрического старения ЭИ.

Рассмотрим это на примере термофлуктуационной теории, предложенной В.С.Дмитревским. Для твердых органических диэлектриков основной структурной цепью является связь С-С.



Здесь представлены в качестве примера химические связи С-С, С-Н и С-*R*, где *R* – группа радикала.

Из курса физики известно, что взаимодействие атомов друг с другом может быть описано графиком

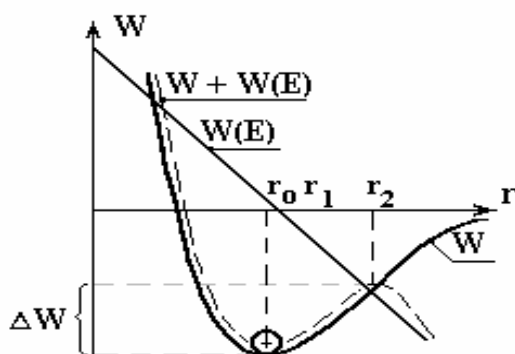


Рис. 9.1 Зависимость энергии взаимодействия атомов от расстояния между ними



Здесь:  $W$  - энергия взаимодействия атомов.

$(r_0=r_1)$  - расстояние между атомами, соответствующее минимуму потенциальной энергии, где силы взаимодействия (притяжения и отталкивания) равны.

$\Delta W$  - высота потенциального барьера, который необходимо преодолеть атому при разрыве химической связи с учетом воздействия нагрузки  $E$ .

За счет воздействия внешнего поля  $E$  кривая энергии взаимодействия искажается и приобретает вид кривой  $[W+W_1(E)]$ . При этом высота потенциального барьера уменьшается.

Если учесть воздействие окружающих атомов (уравнение Шредингера), то высота потенциального барьера будет еще ниже. Следует отметить, что в любом случае высота этого потенциального барьера достаточно велика, чтобы атом мог получить такую энергию только от одного электрического поля. Такую энергию атом может получить только в результате тепловых колебаний (флуктуаций).

Если принять, что энергия разрыва химической связи  $D$  соответствует высоте потенциальной ямы, то

$$\Delta W = D \cdot \varphi(x), \quad (9.2)$$

где:  $\varphi(x)$  - функция, описывающая изменение глубины потенциального барьера от величины и вида воздействующих нагрузок.

$$\varphi(x) = \sqrt{1-2x} - x \ln \left[ \frac{1}{x} + \frac{1}{x} \sqrt{1-2x} - 1 \right], \text{ где} \quad (9.3)$$

$$x = \frac{1}{D} \sqrt{(Ae^{-bT} \beta \eta E)^2 + (\gamma \sigma)^2}, \quad (9.4)$$

Здесь:

$A, \gamma$  - структурно чувствительные коэффициенты;

$v$  - коэффициент, учитывающий изменение модуля упругости материала с температурой;

$E$  - напряженность электрического поля, [В];

$\sigma$  - механическая нагрузка, [Н/м];

$T$  - температура, [°К];

$\eta$  - коэффициент, учитывающей повышение напряженности электрического поля за счет формы электродов;

$\beta$  - коэффициент, учитывающий повышение напряженности электрического поля за счет неоднородности структуры.

$$E_{\max} = \eta \beta E_{cp} \quad (9.5)$$

С точки зрения термодинамики известно, что  $\tau_0 \cong 10^{-13}$  сек, т.е. время перехода атомов из одного равновесного состояния в другое за счет тепловых флуктуаций. Тогда частота тепловых колебаний атомов равна  $1/\tau_0$ .

Исходя из этого, вероятность разрыва химической связи в единицу времени будет равна

$$q = \frac{1}{\tau_0} e^{-\frac{\Delta W}{2KT}}, \quad (9.6)$$

здесь  $q^* = e^{-\frac{\Delta W}{2KT}}$  - вероятность перехода через потенциальный барьер при одном колебании.

Заменяя  $\Delta W$  через энергию связи  $D$ , найдем:

$$q = \frac{1}{\tau_0} e^{-\frac{D \cdot \varphi(x)}{2KT}} \quad (9.7)$$

Условие для разрыва связи – это наступление достоверного события, тогда согласно теории вероятности – ( $q \cdot \tau = 1$ ), отсюда время до разрыва 1-ой связи

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{D \cdot \varphi(x)}{2KT}} \quad (9.8)$$

Из приведенного выражения видно, что время ( $\tau$ ) является функцией параметров ( $E, D, T, A, \sigma, \beta, \eta, \tau_0$ ), о чем говорилось в самом начале.

Если электрическое поле равномерное, то можно принять, что  $\tau = \tau_{проб}$ .

Если электрическое поле неравномерное, т.е.  $\eta$  велико, то разрыв химической связи может происходить, например, при развитии дендрита, т.е. древовидного пробоя (см. рис.9.2).

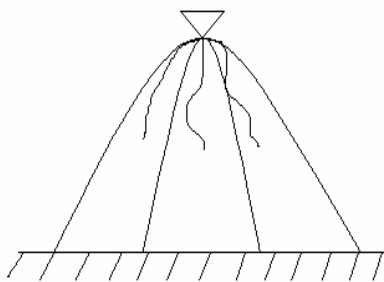


Рис. 9.2. Схема развития дендрита

В этом случае  $\tau_{пр} = \tau_3 + \tau_p + \tau_k$ ,  
где

$$\tau_3 = \tau_0 e^{\frac{D \cdot \varphi(x)}{2KT}} \quad (9.9)$$

$\tau_3$  - время зарождения дендрита;

$\tau_p$  - время развития дендрита;

$\tau_k$  - время зажигания дуги, когда дендрит достигает противоположного электрода.

Данная модель имеет недостатки:

⇒ Не учтено старение материала со временем, т.е. изменение параметров  $A$  и  $\gamma$  ( $A$  и  $\gamma \neq const$ );

- ⇒ Учитывается разрыв только 1-ой связи, что недостаточно для разрушения (разрыв 1-ой нитки в канате);
- ⇒ Считается что  $E$  и  $\sigma$  действуют одинаково;
- ⇒ Сложность определения параметров, входящих в уравнение.

На практике часто используют эмпирические уравнения:

- уравнение экспоненциального вида:

$$\tau_{np} = B \cdot e^{-bE} \quad (9.10)$$

Здесь  $B, b$  - коэффициенты, отражающие условия эксперимента;

- уравнение степенного вида:

$$\tau_{np} = A \cdot E^{-n}, \quad (9.11)$$

где  $A, n$  - постоянные;

$n \approx (4-8)$  для конденсаторной бумаги на  $\sim$  напряжение;

$n \approx (9-12)$  для конденсаторной бумаги на  $=$  напряжение;

$n \approx (50-80)$  для маслобарьерной изоляции на  $\sim$  напряжение.

- уравнение комбинированного вида:

$$\tau_{np} = CU^{-n} \cdot e^{\frac{\Delta W}{KT}} \quad (9.12)$$

Здесь  $C, n, K$  - константы,

$\Delta W$  - высота потенциального барьера,

$T$  - температура в  $^{\circ}\text{K}$ ,

$K$  - постоянная Больцмана.

### **9.1. Уравнение кривой жизни на основе термофлюктуационной теории.**

Ранее было показано, что в основе термофлюктуационной теории лежит представление о разрыве химической связи, как начала процесса разрушения. В случае неоднородности структуры диэлектрика в его объеме будут возникать высокие локальные напряженности электрического поля, что в свою очередь будет облегчать разрыв химической связи.

Для вывода уравнения сделаем следующие допущения:

1. Всякий реальный диэлектрик неоднороден и содержит различные неоднородности, в области расположения которых создается высокая локальная напряженность электрического поля.

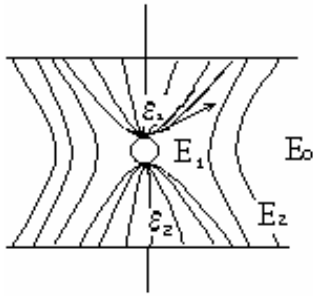


Рис.9.3. Искажение поля при наличии неоднородности.

На рис.9.3 показано искажение поля при наличии в диэлектрике воздушного включения.

Согласно теории электромагнетизма  $\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2$ , т.е. происходит перераспределение поля обратно пропорционально диэлектрическим проницаемостям.

Т.к.  $(\epsilon_1 = 1.0) < \epsilon_2$ , то  $E_1 > E_2$ .

Увеличение напряженности электрического поля за счет наличия неоднородности можно также описать уравнением:

$$E_n = \beta \cdot E_0 = \beta \cdot E \tag{9.13}$$

С учетом неоднородности поля за счет электродной системы:

$$E_n = \eta \cdot \beta \cdot E \tag{9.14}$$

2. Неоднородности расположенные рядом, заменим условно эллипсоидом вращения.

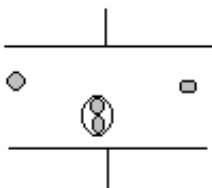


Рис.9.4. Рядом расположенные неоднородности

$$\beta = \frac{4\nu}{4 + \chi - \chi\nu} \tag{9.15}$$

$$\nu = \frac{\frac{1}{\rho_1} + j\epsilon_1\omega}{\frac{1}{\rho_2} + j\epsilon_2\omega} = \frac{\gamma_1 + j\epsilon_1\omega}{\gamma_2 + j\epsilon_2\omega} \tag{9.16}$$

Здесь:

$\gamma_1 \cdot \epsilon_1$  - электропроводность и диэлектрическая проницаемость неоднородности;

$\gamma_2 \cdot \epsilon_2$  - электропроводность и диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

$\omega$  - угловая частота.

$$\chi = \frac{2}{y^2 - 1} \left( 2 - \frac{y}{\sqrt{y^2 - 1}} \ln \frac{y + \sqrt{y^2 - 1}}{y - \sqrt{y^2 - 1}} \right) \tag{9.17}$$

Данное выражение после упрощения принимает вид:

$$\chi = -4 \left( 1 - e^{-\frac{0.41}{y^{1.22}}} \right) \quad (9.18)$$

Здесь  $y$  - величина, выражающая соотношение осей эллипсоида вращения (зависит от числа рядом стоящих неоднородностей).

Подставляя (9.17) в (9.15), получим:

$$y = \frac{0.482}{\left( \ln \frac{1 - \frac{1}{\nu}}{1 - \frac{1}{\beta}} \right)^{0.82}} \quad (9.19)$$

3. Все неоднородности расположены в объеме диэлектрика случайно, т.е. вероятность появления события, когда неоднородности располагаются вдоль линий электрического поля и обуславливают создание наиболее высокой напряженности поля, будет определять вероятность разрыва химической связи, т.е. вероятность отказа или вероятность безотказной работы.

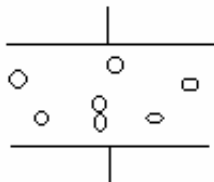


Рис.9.5.  
Распределение  
неоднородностей

Исходя из этого, вычисляя  $\beta$  и вводя параметры распределения  $\nu_0$  и  $p$ , найдем функцию распределения наибольшего значения  $y$ :

$$F(y) = \left( 1 - e^{1.67y \ln 1.3p} \right)^{\frac{\ell S}{\nu_0 \eta y}} \quad (9.20)$$

-Вероятность безотказной работы

$$P(\tau) = \left( 1 - e^{\frac{0.83 \ln 1.3p}{Z}} \right)^{\frac{\ell S}{0.482 \nu_0 \eta Z}} \quad (9.21)$$

$$Z = \left[ \frac{\ln \frac{1 - \frac{1}{\nu}}{\frac{\beta_1 \left( \frac{Ae^{-bT} \eta E}{D} \right)^2 \ln \left( \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_1} \sqrt{1 - 2x_1} - 1 \right)}}{\sqrt{1 - 2x_1} - \frac{1}{x_1} \left( \frac{\gamma \sigma}{D} \right)^2 \ln \left( \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_1} \sqrt{1 - 2x_1} - 1 \right) - \frac{2KT}{D} \ln \frac{\tau}{\tau_0}} \right]^{0.82} \quad (9.22)$$

Здесь:

$\beta_1$  - const;

$x_1$  - значение  $x$  при  $\beta = \beta_1$ ;

$\nu_0$  - элементарный объем, содержащий хотя бы одну неоднородность;

$p$  - концентрация неоднородностей;

$l$  - толщина диэлектрика;

$s$  - площадь электродов.

Анализируя выражение (9.22) можно записать:

$$P(\tau) = f(A, \gamma, b, \tau_0, D, K, E, \sigma, T, \nu, p, \nu_0) \quad (9.23)$$

где:

$\tau_0, D$  - характеристики материала;

$K, E, \sigma, T$  - известные величины;

$A, \gamma, b, \nu, p, \nu_0$  - параметры уравнения, которые требуют предварительного определения.

## 9.2. Уравнение кривой жизни с учетом частичных разрядов (ЧР)

Исходя из механизма действия ЧР и того влияния, которые они оказывают на ЭИ, можно считать, что ЧР будут вызывать уменьшение срока службы за счет дополнительного разрыва химических связей, т.е.

$$q_{чр} = \frac{1}{\tau_0} e^{-\frac{D \varphi(x_{чр})}{2KT}}, \quad (9.24)$$

где

$$\varphi(x_{чр}) = \sqrt{1 - 2x_{чр}} x_{чр} \ln \left( \frac{1}{x_{чр}} + \frac{1}{x_{чр}} \sqrt{1 - 2x_{чр}} - 1 \right) \quad (9.25)$$

$$x_{чр} = \frac{Ae^{-bT_{чр}} \beta_{чр} \eta}{D} \quad (9.26)$$

Тогда:

$$q_{чр} \cdot \tau_{чр} + q \cdot (\tau - \tau_{чр}) = 1 \quad (9.27)$$

где:  $\tau$  - общее время до пробоя ЭИ;

$\tau_{чр}$  - время действия ЧР;

$q$  - вероятность разрыва связи без учета действия ЧР.

Отсюда:

$$\tau = \tau_{чр} - \frac{q_{чр} \tau_{чр}}{q}, \quad (9.28)$$

т.е. время жизни изоляции будет меньше даже  $\tau_{чр}$ .

### 9.3. Расчет времени до отказа при заданной вероятности безотказной работы $P(\tau)$

При воздействии на изоляцию различных видов нагрузок, которые могут быть постоянными, переменными или случайными, согласно термофлюктуационной теории время до пробоя можно оценить

$$\tau = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\tau_i}{\tau_n} \left( q_i + \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\tau_j}{\tau_i} q_{ij} \right)}, \quad (9.29)$$

здесь:

$\tau$  - время до пробоя;

$\tau_i$  - время действия нагрузки за 1 цикл (продолжительность действия электрического поля и температуры);

$\tau_n = \tau_{cod} = 31.536 \cdot 10^6$  сек;

$\tau_j$  - время действия случайной нагрузки за один цикл перенапряжения;

$n$  - число интервалов в год;

$N$  - число перенапряжений;

$q_i$  - вероятность разрушения (связи) диэлектрика под действием  $i$ -го комплекса постоянной нагрузки ( $E_i, T_i, \sigma_i$ );

$q_{ij}$  - вероятность разрушения изоляции под действием случайной нагрузки в результате перенапряжения.

При случайной нагрузке согласно теории вероятности

$$(q_1 \cdot \tau_1 + q_2 \cdot \tau_2 + \dots + q_n \cdot \tau_n) = (\sum q_i \cdot \tau_i) = 1.$$

Здесь  $\sum \tau_i = \tau$

$$q_i = \frac{1}{\tau_0} e^{-\frac{D}{2KT} \cdot \varphi(x)} \quad (9.30)$$

При постоянстве значений  $E, T, \sigma = const.$

$$\varphi(x) = \sqrt{1-2x} - x \ln \left[ \frac{1}{x} + \frac{1}{x} \sqrt{1-2x} - 1 \right] \quad (9.31)$$

$$x = \frac{1}{D} \sqrt{\left( A e^{-bT} \beta \eta E_i \right)^2 + (\gamma \sigma)^2} \quad (9.32)$$

При  $\sigma = 0$

$$x = \frac{1}{D} \cdot \left( A e^{-bT_i} \beta \eta E_i \right) \quad (9.33)$$

$$\beta = \frac{\nu}{1 + (\nu - 1) \frac{1}{y^2 - 1} \left( \frac{y}{\sqrt{y^2 - 1}} \ln \left( y + \sqrt{y^2 - 1} \right) \right)} \quad (9.34)$$

Здесь - коэффициент неравномерности электрического поля за счет конфигурации электродов:

$$\eta = \frac{r_i - r_{i-1}}{r_{i-1} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \quad (9.35)$$

1. Для органической (бумажно-масляной) изоляции зададимся параметрами:  $D = (4.0 - 6.0) \cdot 10^{-19}$ , [Дж/связь];  $A = (3.5 - 4.5) \cdot 10^{-27}$ , [Дж/связь · м/В];  $B = (0.001 - 0.003)$ , [1/град];  $\nu = (5 - 8)$ ;  $p = (0.15 - 0.3)$ ;  $\nu_0 = (1 - 4) \cdot 10^{-7}$ , [м<sup>3</sup>];  $\tau_0 \cong 10^{-13}$ , [сек].

2. Исходя из заданной вероятности безотказной работы  $P(\tau) = 0.99$  найдем вероятность безотказной работы одного слоя изоляции

$$P_n(\tau) = [P(\tau)]_n^{\frac{1}{n}} \quad (9.36)$$

3. Примем, что  $F(y) = P_n(\tau)$ .

$$P_n(\tau) = F(y) = \left[ 1 - e^{1.67 y \ln(1.3 p)} \right] \frac{\ell S}{\nu_0 \eta y} \quad (9.37)$$

Здесь  $\ell S$  - объем 1 слоя изоляции (из таблицы электрического расчета для 1-го слоя изоляции у ТПС)  $\ell = \Delta_{из.слоя} = r_i - r_{i-1}$ , а  $S_{обкл} = 2 \pi \cdot r_i \cdot l_i$ .



$$\eta = \frac{r_i - r_{i-1}}{r_{i-1} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \quad (9.38)$$

Методом подбора найдем ( $y$ ) из уравнения

4. Зная ( $y$ ), найдем ( $\beta$ )

$$\beta = \frac{\nu}{1 + (\nu - 1) \frac{1}{y^2 - 1} \left( \frac{y}{\sqrt{y^2 - 1}} \ln \left( y + \sqrt{y^2 - 1} \right) \right)} \quad (9.39)$$

5. Зная пределы изменения рабочих температур из теплового расчета, найдем температуры для изоляции и продолжительность их действия в году (таблица 9.1):

Таблица 9.1

$T_{oc}, ^\circ\text{K}$	- 20	0	20	40
$T_{из}, ^\circ\text{K}$ (Из теплового расчета)	...	...	...	...
Продолжительность действия $\tau_i$ , сек.	$5 \cdot 10^6$	$1,95 \cdot 10^7$	$11 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$

$$\sum \tau_i = \tau_n = \tau_{год} = 31.536 \cdot 10^6 \text{ сек.}$$

6. Перенапряжения, являющиеся случайными величинами, заменим переменными с параметрами:

$\bar{U}$  - математическое ожидание (в кВ);

$\sigma$  - среднеквадратическое отклонение (в кВ).

Тогда

$$\bar{U}_j = \bar{U} \pm 4 \cdot \sigma \quad (9.40)$$

Число интервалов (разрядов)

$$N = \frac{U_{j_{\max}} - U_{j_{\min}}}{\sigma} \quad (9.41)$$

Ширина интервала

$$\Delta U_j = \frac{U_{j_{\max}} - U_{j_{\min}}}{N} = \sigma \quad (9.42)$$

Примем, что распределение этих величин подчиняется нормальному закону распределения.

7. Напряженность поля, возникающая в слое изоляции под действием импульса перенапряжения, будет равна:

$$\eta E_j = \eta \frac{\Delta U_{jcp}}{\Delta_{\text{слоя}}} = \eta \frac{U_{jcp} K_i}{(r_i - r_{i-1}) \cdot \sum_{i=1}^n K_i} = \frac{(r_i - r_{i-1})}{r_{i-1} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \cdot \frac{U_p \cdot U_{jcp} \cdot K_i}{U_p (r_i - r_{i-1}) \sum_{i=1}^n K_i} =$$

$$= \frac{U_{jcp}}{U_p} \cdot \frac{\Delta U_{i_p}}{r_{i-1} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} = \frac{U_{jcp}}{U_p} \cdot E_{r_{i\_раб}}$$

Здесь приняты обозначения

$$K_i = \frac{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{\ell_i}, \quad \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{\ell_i} \quad (9.43)$$

8. Найдем отношение

$$\frac{\tau_j}{\tau_i} = \frac{N \tau_{умп}}{\tau_{зод}} \cdot \Delta F(U_j) \quad (9.44)$$

Здесь:  $\tau_{умп}$  - длительность одного импульса;

$\tau_{зод} = 31.536 \cdot 10^6$  сек

$\tau_j = N \tau_1 \cdot \Delta F(U_j)$

$\tau_i$  - по таблице при температуре  $T_i$

9. Заполняем таблицу распределения (таблица 9.2)

Таблица 9.2

$j$	$U_j$ , кВ	$U_{j-1}$ , кВ	$U_{jcp}$ , кВ	$\frac{U_j - \bar{U}}{\sigma}$	$F\left(\frac{U_j - \bar{U}}{\sigma}\right)$	$F(U_j)$	$\frac{U_{j-1} - \bar{U}}{\sigma}$	$F\left(\frac{U_{j-1} - \bar{U}}{\sigma}\right)$
1	20	0	10	-3	-0.498	-0.0013	-4	-0.4999
2	40	20	30	-2	-0.47	0.0228	-3	-0.498
3	60	40	50	-1	-0.34	0.1587	-2	-0.47
4	80	60	70	0	0	0.500	-1	-0.34
5	100	80	90	1	0.34	0.8413	0	0
6	120	100	110	2	0.47	0.9772	1	0.34
7	140	120	130	3	0.498	0.9987	2	0.47
8	160	140	150	4	0.499	0.9999	3	0.498
9	180	160	170	5	0.499	0.9999	4	0.499

Продолжение таблицы 9.2

$F(U_{j-1})$	$\Delta F(U_j)$	$\eta E_j,$ В/м	$\frac{\tau_j}{\tau_i}$

$$F\left(\frac{U_j - \bar{U}}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{U_j - \bar{U}}{\sigma}\right) \tag{9.45}$$

- значение функции найдем как табличное значение интеграла Лапласа для нормального закона.

$$F(U_j) = 0.5 + \Phi\left(\frac{U_j - \bar{U}}{\sigma}\right) \tag{9.46}$$

10. Зная  $\beta, \tau_i, \eta \cdot E_i, T_i$ , найдем при  $\gamma\sigma = 0$ .

$$x = \frac{1}{D} A e^{-bT_i} \beta \eta E_i \tag{9.47}$$

$$\varphi(x) = \sqrt{1-2x} - x \ln\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x} \sqrt{1-2x} - 1\right) \tag{9.48}$$

$$q_i = \frac{1}{\tau_0} e^{-\frac{D}{2KT_i} \cdot \varphi(x)} \tag{9.49}$$

Данные расчета заносим в таблицу 9.3

Таблица 9.3

j	$T_{iuz} = \dots$				$T_{iuz} = \dots$			
	$x_j$	$\Phi(x)_j$	$q_i$	$q_{ji} \cdot \frac{\tau_j}{\tau_i}$	$x_j$	$\Phi(x)_j$	$q_i$	$q_{ji} \cdot \frac{\tau_j}{\tau_i}$

11. Расчет времени до отказа производим по уравнению:

$$\tau = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\tau_i}{\tau_n} \left( q_i + \sum_{j=1}^{j=N} q_{ij} \frac{\tau_j}{\tau_i} \right)} \tag{9.50}$$

Здесь:

$q_i$  - вероятность разрушения (связи) диэлектрика при  $T_i$  и амплитудном значении рабочей напряженности

$q_{ij}$  - вероятность разрушения изоляции при  $T_i$  и  $\eta \cdot E_j$

#### 9.4. Частичные разряды и их роль при пробое твердых диэлектриков.

В реальных ЭИК всегда имеются различные неоднородности в виде воздушных включений, прослоек между отдельными слоями, микротрещин, отслоения изоляции и др.

За счет перераспределения электрического поля согласно различию  $\varepsilon$  и  $\gamma$ , т.е.  $\varepsilon_1 \cdot E_1 = \varepsilon_2 \cdot E_2$  или  $\gamma_1 \cdot E_1 = \gamma_2 \cdot E_2$  в местах этих неоднородностей возникает высокая локальная напряженность поля

Опыт показывает, что наиболее опасное развитие ЧР наблюдается на переменном напряжении.

ЧР- это неполный пробой изоляции, т.е. развитие разряда в области воздушного включения, где имеет место высокая локальная напряженность поля. Развитие ЧР приводит к интенсивному износу ЭИ в области воздушного включения с последующим пробоем всей ЭИ.

Это связано с тем, что ЧР вызывают:

- ⇒ Повышение локальной напряженности в зоне ЧР.
- ⇒ Эрозию стенок включения за счет бомбардировки ионами и электронами, образующимися при ЧР.
- ⇒ Повышение локальной температуры в зоне ЧР за счет выделения здесь энергии.
- ⇒ Окисление за счет образования активных продуктов (озон, кислоты, щелочи).
- ⇒ Облучение светом от Уф до ИК спектра в зоне ЧР.

Рассмотрим модель твердого диэлектрика с газовой полостью, расположенной параллельно электродам (рис. 9.6).

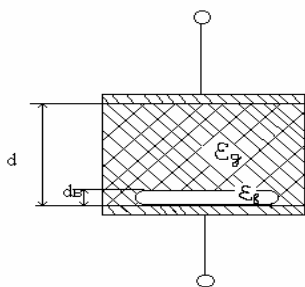


Рис.9.6. Диэлектрик с газовой полостью

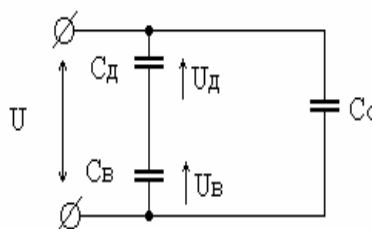


Рис.9.7. Схема замещения

Исходя из схемы замещения такого диэлектрика (рис. 9.7) и принимая, что развитие частичных разрядов происходит при условии достижения напряженности поля на воздушной полости значения  $E_{np.в}$  найдем:

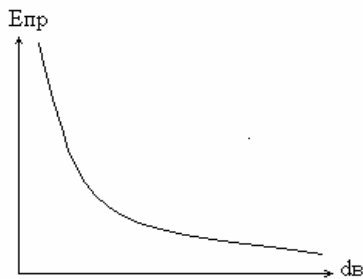


Рис. 9.8. Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния.

$$U_{ни} = E_{np.в} \left[ d_в + \frac{\epsilon_в}{\epsilon_д} (d - d_в) \right] \quad (9.51)$$

Здесь  $U_{ни}$  - напряжение начала ионизации;  $\epsilon_в$ ,  $\epsilon_д$  - диэлектрическая проницаемость воздуха и диэлектрика без включения;  $d$ ,  $d_в$  - общая толщина диэлектрика и толщина воздушного включения.

В качестве характеристик частичных разрядов кроме напряжения начала ионизации -  $U_{чр}$  различают также: количество частичных разрядов в единицу времени (частоту следования Ч.Р) -  $n_{чр}$ ; кажущийся заряд единичного Ч.Р -  $q_{чр}$ ; энергию частичного разряда  $W_{чр} = q_{чр} \cdot U_{чр}$ ; ток частичного разряда  $I_{чр} = q_{чр} \cdot n_{чр}$  и мощность частичного разряда  $P_{чр} = n_{чр} \cdot W_{чр}$ .

Для измерения характеристик частичных разрядов применяются различные схемы. На рис. 9.9 представлена наиболее часто встречаемая электрическая схема измерения характеристик ЧР.

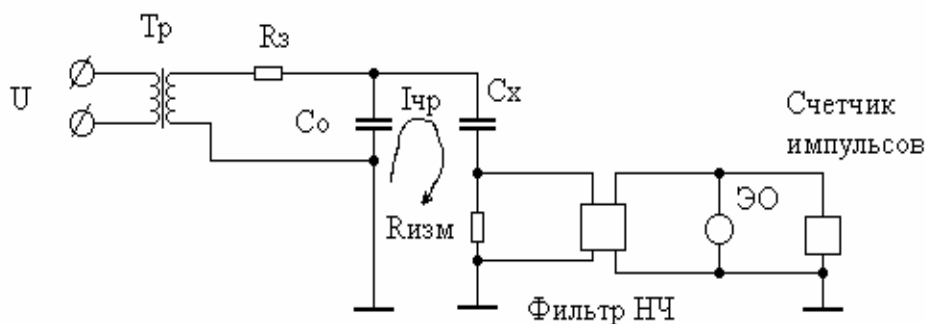


Рис.9.9. Электрическая схема установки для измерения Х.Ч.Р.

Характер проявления частичных разрядов зависит от формы приложенного напряжения.

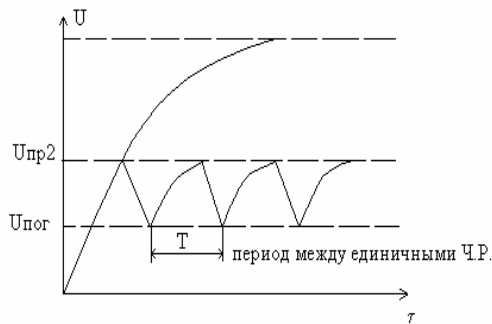


Рис.9.10. Частичные разряды на постоянном напряжении.

На рис.9.10. показан характер проявления частичных разрядов на постоянном напряжении.

Периодичность ЧР обусловлена величиной  $\tau = R \cdot C = A \cdot \rho_v \cdot \varepsilon$ , т.е. постоянной времени разряда емкости воздушного включения (временем стекания заряда).

Здесь  $A$ —некоторая постоянная. Кроме того, периодичность ЧР зависит от соотношения напряжения зажигания и напряжения погасания разряда

$$T = \tau \frac{U_{ни} - U_{пог}}{U_m}, \quad (9.52)$$

здесь:  $U_{ни}$  - напряжение начала ионизации;  
 $U_{пог}$  - напряжение погасания разряда;  
 $U_m$  - амплитуда приложенного напряжения.

На рис.9.11 показан характер проявления частичных разрядов на переменном напряжении.

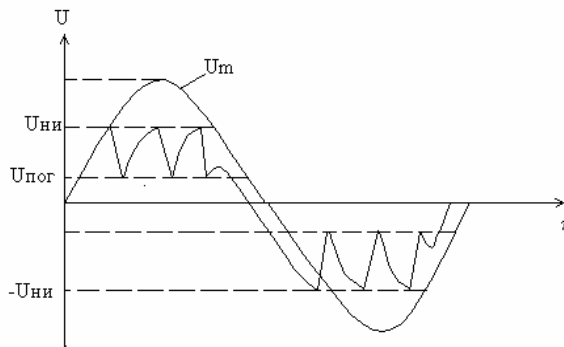


Рис.9.11. Частичные разряды на переменном напряжении

Из рис.9.11 видно, что периодичность, т.е. интенсивность частичных разрядов на переменном напряжении значительно выше, чем на постоянном напряжении. Их периодичность также определяется соотношением напряжения зажигания и погасания разряда, но в большей степени зависит от частоты приложенного напряжения.

Количество частичных разря-

дов можно найти:

- На переменном напряжении

$$n_{чр} = 4f \left( \frac{U_m - U_{пог}}{U_{ни} - U_{пог}} \right) \quad (9.53)$$

- На постоянном напряжении

$$n_{чр} = \frac{\gamma}{\varepsilon_0 \cdot \left( \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \frac{d_1}{d_2} \right) \ln \left( \frac{U_m - U_{пог}}{U_{ни} - U_{пог}} \right)} \quad (9.54)$$

Здесь:  $\gamma$  - электропроводность диэлектрика;

- $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика и газового включения;  
 $d_1, d_2$  – толщина диэлектрика и газового включения;  
 $f$  – частота приложенного напряжения.

### 9.5. Особенности расчёта срока службы силовых конденсаторов

В основу расчёта срока службы ЭИ силовых конденсаторов, как и других ЭИК может быть положена методика определения надёжности согласно термофлюктуационной теории, которая изложена ранее. Однако следует сразу отметить, что эта методика применима только для оценки надёжности отдельно взятой секции конденсатора. На надёжность реального конденсатора большое влияние оказывает вид схемы внутренних соединений секций. Можно выделить следующие виды соединений:

- а) параллельно последовательное соединение;
- б) параллельно последовательное соединение с индивидуальными предохранителями;
- в) последовательно параллельное соединение;
- г) последовательно параллельное соединение с индивидуальными предохранителями.

В соответствии с особенностями межсекционных соединений и наличием межсекционной и корпусной изоляции меняется толщина изоляции. В зависимости от схемы соединения отдельных секций может возникать паразитная ёмкость, величина которой будет зависеть от толщины изоляции и от характера взаимного соединения наружной и внутренних обкладок соседних секций друг с другом. Можно выделить три случая:

- а) соединение наружных обкладок.
- б) соединение наружной с внутренней обкладкой.
- в) соединение внутренних обкладок.

В случае (а), когда у соседних секций соединены наружные обкладки, паразитная ёмкость минимальна. Для случаев (б и в) образуется паразитная ёмкость  $C_{пар}$  между наружными обкладками.

$$C_{пар} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (9.55)$$

где  $d$  – толщина изоляции, входящая в паразитную ёмкость.

Различают:

$C_{нс}$  – паразитная ёмкость между соседними секциями в группе;

$C_{пгр}$  – паразитная ёмкость между последовательными группами;  
 $C_{пк}$  – паразитная ёмкость на корпус.

Так как изоляция, входящая в паразитную ёмкость, обладает более худшими диэлектрическими свойствами по сравнению с изоляцией между обкладками, то срок службы конденсаторов будет зависеть от параметров паразитной ёмкости. На рис.9.12 и рис.9.13 представлены данные о выходе из строя силовых конденсаторов в зависимости от схемы соединения секций и обкладок.

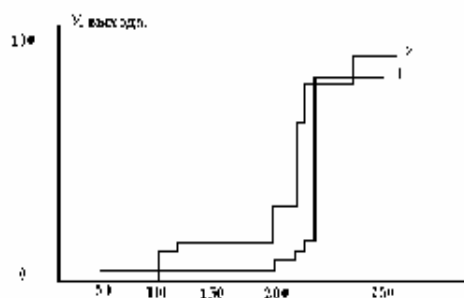


Рис. 9.12. Выход из строя (%) при ускоренных испытаниях на срок службы при  $E=40$  кВ/мм и  $f=50$  Гц для конденсаторов при соединении внутренних обкладок двух последовательных секций с бумажно-трихлордифениловой изоляцией. 1 - диэ.пар.сек. - 40 мкм. 2 - диэ.пар.сек. - 80 мкм.

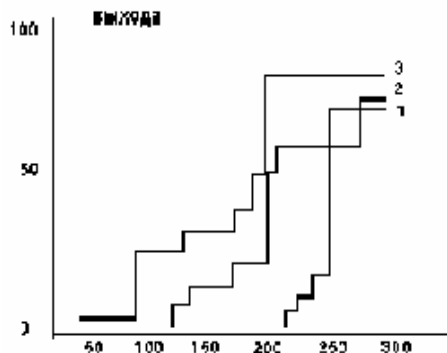


Рис. 9.13. Выход из строя (%) в течение ускоренных испытаний на срок службы при  $E = 40$  [кВ/мм] и  $f = 50$  Гц. для силовых конденсаторов с бумажно-трихлордифениловой изоляцией с 2-мя последовательными группами секций при различном соединении обкладок. 1 - наружные с наружными. 2 - наружные с внутренними. 3 - внутренние с внутренними.

Срок службы изоляции таких конденсаторов можно описать эмпирическим уравнением, которое отражает зависимость  $\tau = f(E, d)$ .

$$\tau = \frac{a \cdot b}{U^n d^{(m-n)}} \quad (9.56)$$

Здесь  $a, b, m, n$  – коэффициенты, зависящие от особенностей конструкции и технологии изготовления

Для конденсаторной бумажно-масляной изоляции установлены:



$$a = 10^{(A_1 - A_2 d)}; \quad n = N_1 - N_2 d;$$

$$b = 10^{\left(B_1 - B_2 \frac{U}{d_{уз}}\right)}; \quad m = M_1 - M_2 \frac{U}{d_{уз}}$$

Здесь  $A_1 = 19.54$ ;  $B_1 = 21.9$ ;  $N_1 = 11.6$ ;  $A_2 = 0.133$ ;  $B_2 = 0.236$ ;  $N_2 = 0.856$ ;  $M_1 \approx 10$ ;  $M_2 \approx 0.1$ .

Значения параметров для различных схем соединения приведены в таблице 9.4

Таблица 9.4.

Схема соединения	Ураб, [кВ]	$m$	$L$	Математическое ожидание - $\tau$ , год
<b>а</b>	1.05	1	30	38.5
	3.15	3	10	39.0
	6.3	6	5	40.7
	10.50	10	3	41.1
<b>б</b>	1.05	1	30	435.0
	3.15	3	10	38.6
	6.30	6	5	33.6
	10.5	10	3	24.0
<b>в</b>	1.05	1	30	38.5
	3.15	3	10	4.3
	6.30	6	5	5.9
	10.5	1	3	8.6
<b>г</b>	1.05	1	30	435.0
	3.15	3	10	130.0
	6.30	6	5	58.5
	10.5	10	3	45.5

Здесь:  $m$  - число последовательных групп или секций;

$L$  - число параллельных групп или секций.

Из данных расчёта следует, что при используемых величинах  $m$  и  $l$  наиболее надёжна схема (г), т.е. при последовательно – параллельном соединении секции с индивидуальными предохранителями в секции.

Математическое ожидание срока службы определялось по уравнению:

$$T_0 = T_i \sum_{i=1}^{i=\ell} \frac{1}{i} = \frac{1}{\lambda} \sum_{z=0}^{z=m-1} \frac{1}{(m-z) \left(\frac{m}{m-z}\right)^n} \sum_{i=1}^{i=\ell} \frac{1}{i}, \quad (9.57)$$

Здесь:

$$T_i = \frac{1}{\lambda_c} \sum_{z=0}^{z=m-1} \frac{1}{(m-z) \left( \frac{m}{m-z} \right)^n}, \quad (9.58)$$

Значения коэффициента теплопроводности материалов:

- для трихлордифенила  $\lambda = (0.0974 + 0.00018 t)$ , [Вт/м.град];
- для конденсаторного масла  $\lambda = (0.114 - 0.00022 t)$ , [Вт/м.град];
- для клетчатки  $\lambda = (0.166 + 0.00227 t)$ , [Вт/м.град];
- для полипропилена  $\lambda = (0.073 + 0.0011 t)$ , [Вт/м.град].

Для комбинированной многокомпонентной изоляции происходит перераспределение напряжённостей электрического поля.

$$E_i = \frac{E}{\varepsilon_i \sum_{m=1}^{m=n} \frac{x_m}{\varepsilon_m}} \quad (9.59)$$

Здесь:  $x_m$  – объёмная доля компоненты;

$\varepsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость компоненты.

Срок жизни рассчитывается

$$\tau = 10 \left[ a - b \left( \frac{tg \delta^1}{\lambda} \right) \right], \quad (9.60)$$

Здесь:

$a, b$  – постоянные коэффициенты;

$tg \delta^1 / \lambda$  – теплофизический фактор;

$tg \delta^1$  – фактор мощности.

$tg \delta^1 = \varepsilon tg \delta$ , где

$$\varepsilon = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_i}{\varepsilon_i}}, \quad tg \delta = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\varepsilon \cdot tg \delta_i x_i}{\varepsilon_i}, \quad \lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_i}{\lambda_i}}$$

Для оценки срока службы комбинированной изоляции в литературе более известна формула.

$$\tau = \frac{A}{E^n}, \quad (9.61)$$

Здесь:  $A$  – постоянный коэффициент, зависящий от материала;

$n$  – показатель степени, зависящий от стабильности изоляции и её толщины.

Расчёты по этим двум формулам дают схожие результаты.

## 10. Особенности конструирования и расчёта ЭИ кабелей, проводов, трансформаторов и др. ЭИК

Кабели, провода и трансформаторы предназначены для передачи и преобразования электромагнитной энергии от источника электрической энергии к потребителям. В связи с протеканием в них нагрузочного тока следует рассматривать взаимодействие электрического и магнитного полей. Наибольшее взаимодействие между ними проявляется на переменном электрическом токе.

Для электромагнитного поля характерны следующие свойства:

1. Электромагнитное поле распространяется в данной среде со скоростью.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (10.1)$$

Здесь:  $\epsilon$ ,  $\mu$  – соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемость среды;

$c$  – скорость распространения света в вакууме .

Для воздуха:  $\epsilon \approx \mu \approx 1$ ,  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с.

2. Всякое изменение электрического поля вызывает появление переменного магнитного поля, и, наоборот, всякое изменения магнитного поля вызывает появление переменного электрического поля.

3. Линии напряжённостей электрического и магнитных полей взаимно перпендикулярны.

4. Линии напряжённости магнитного поля замкнуты и охватывают проводник с током или переменным электрическим полем.

5. Линии напряжённости электрического поля идут от одного электрического заряда к другому или представляют собой замкнутые линии, охватывающие переменное магнитное поле.

6. Линии напряжённости магнитного поля у поверхности проводника с током параллельны этой поверхности.

7. Линии напряжённости электрического поля перпендикулярны к поверхности проводника.

Воздействие магнитного поля выражается:

1) Переменное магнитное поле, вызываемое переменным током, увеличивает электрическое сопротивление проводников за счёт вытеснения тока на поверхность.

2) Переменное магнитное поле, пересекая проводник или окружающие проводники и экраны, наводит в них вихревые токи, которые взаимодействуют с основным током и приводят к образованию поверхностного эффекта и эффекта близости.

3) Переменное магнитное поле является источником помех и требует специальных защитных мероприятий.

4) За счёт электромагнитного поля (особенно в режиме К.З.) возникают электродинамические усилия притяжения или отталкивания, которые будут воздействовать на обмотку трансформаторов и межфазную изоляцию в кабелях.

### ***10.1. Особенности расчета кабелей и проводов***

Отличительной особенностью кабельных изделий является их большие строительные длины и разнообразие в конструктивном исполнении. По назначению и особенностям конструкции различают одножильные и многожильные силовые кабели, масло и газонаполненные кабели под давлением, кабельные линии в стальных трубах под давлением масла или газа, кабели связи и т. д. По типу электрической изоляции различают кабели с бумажно-масляной, резиновой, пластмассовой изоляцией и др.

Основным конструктивным элементом кабеля является токоведущая жила (твж) круглой, сегментной или секторной формы, изготовленной из меди или алюминия. На эту жилу накладывается изоляция в виде пропитанных бумажных лент из кабельной бумаги, резины и различных пластмасс. Поверх изоляции могут накладываться полупроводящие покрытия для выравнивания электрического поля, защитные оболочки из пластмассы или резины. Кроме того, для защиты от механических повреждений поверх оболочки может накладываться броня из стальных лент или проволок. Все эти элементы оказывают соответствующее влияние на распределение и однородность электрического поля, что нужно учитывать при расчете электрической изоляции. Очень часто для выравнивания электрического поля в кабеле применяется градирование изоляции. Применение двух-трехслойного градирования позволяет снизить максимальную напряженность поля на 20-30 %. В кабелях с многопроволочными жилами для выравнивания электрического поля применяется наложение на твж полупроводящего покрытия.

Как и в других ЭИК, на надежность кабелей и их срок жизни большое влияние оказывают частичные разряды, возникающие в воздушных прослойках, которые образуются в изоляции за счет неплотной намотки бумажных лент, плохой пропитки или др. причин. Поэтому при выборе рабочей напряженности поля необходимо учитывать все эти факторы.

### ***10.2. Особенности расчета высоковольтных трансформаторов и электрических машин***

Отличительной особенностью конструкции трансформаторов, электрических машин и других, подобным им ЭИК, является наличие магнитного сердечника и обмотки из провода. Магнитный сердечник, выполняющий

функции магнитопровода, оказывает большое влияние на конфигурацию электрического поля. Как правило, наличие такого сердечника приводит к росту неоднородности электрического поля, вызывая, тем самым, увеличение его напряженности.

В изоляции трансформаторов и электрических машин различают главную и витковую изоляцию. К главной изоляции относится изоляция между обмотками высокого и низкого напряжения, а также между обмотками и сердечником магнитопровода, ярмом и корпусом трансформатора или электрической машины. Витковой изоляцией является изоляция между витками катушки обмоток.

Главная изоляция таких ЭИК подвергается воздействию напряжения промышленной частоты, а также воздействию кратковременных внутренних и атмосферных перенапряжений. Поэтому электрическая прочность главной изоляции определяется испытательным напряжением в соответствии с ГОСТ 1516-76.

В зависимости от типа конструкции ЭИК для изготовления главной изоляции широко применяются: маслобарьерная и бумажно-масляная изоляция, электрокартон, текстолит, гетинакс, трансформаторное масло и высокопрочные газы.

На рис.10.1 приведена схема главной изоляции высоковольтного трансформатора напряжения до 35 кВ.

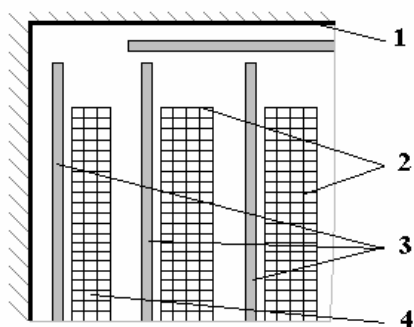


Рис.10.1. Схема главной изоляции трансформатора

- 1.-сердечник магнитопровода;
- 2.-обмотка высокого напряжения;
- 3.-изоляционный сердечник;
- 4.-обмотка низкого напряжения.

В высоковольтных трансформаторах в качестве главной изоляции применяется трансформаторное масло, заливаемое в бак трансформатора. Катушки низкого и высокого напряжения отделяются друг от друга и от бака трансформатора изоляционными цилиндрами, играющими роль барьера. Имеются конструкции высоковольтных трансформаторов, у которых в качестве главной изоляции используется бумажно-масляная изоляция или литая изоляция на основе эпоксидных смол.

Расчет такой изоляции проводится по методике, описанной ранее. В случае маслобарьерной изоляции допустимая напря-

женность поля при одноминутном испытательном напряжении не должна превышать 70 кВ/см, а допустимая рабочая напряженность 40 кВ/см.

В качестве витковой изоляции обмоток трансформаторов или электрических машин в основном используется эмаль изоляция. Эта изоляция может дополняться слоями бумаги или хлопчатобумажной пряжи как механического барьера, предохраняющего ее от механического повреждения при намотке или сборке. Прочность витковой изоляции определяется импульсными воз-

действиями, при которых вследствие неравномерности распределения напряжения создаются большие градиентные перенапряжения. На промышленной частоте межвитковые напряжения значительно ниже по сравнению с импульсными и составляют несколько десятков вольт на виток.

Следует отметить, что при расчете как главной, так и межвитковой изоляции необходимо учитывать воздействие частичных разрядов, приводящих к ионизационному разрушению материала диэлектрика.

#### Литература

1. Дмитриевский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981. – 3921 с.
2. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
3. Ренне В.Т., Багалеи Ю.В., Фридберг И.Д. Расчет и конструирование конденсаторов. – Киев; Техника, 1966. 326 с.
4. Синявский В.Н. Расчет и конструирование электрокерамических конструкций. – М.; Энергия, 1977. – 192 с.
5. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. – М.; Изд-во «Высшая школа», 1966. – 224 с.
6. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.; Энергоатомиздат, 1988. – 719 с.
7. Л.А.Бессонов Теоретические основы электротехники. – М.; Изд-во «Высшая школа», 1973. –750 с.
8. Румшинский Л.З. Элементы теории вероятностей, М.; Изд-во «Наука», 1970. – 255 с.
9. Митропольский А.К. Техника статических вычислений. М.; Изд-во «Наука», 1971. – 576 с.
10. Мартин Ф. Моделирование на вычислительных машинах. М.; Изд-во «Советское радио», 1972.- 288 с.
11. Методы электрических испытаний. Условия окружающей среды при нормализации, кондиционировании и испытании. Гост 6433.1-71 – ГОСТ 6433.4-71.
12. Внутренние перенапряжения и работа загрязненной изоляции. Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ-72). Под ред. В.В.Бургсдорфа и А.К.Лоханина. М.; «Энергия», 1975.- 224 с.
13. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кизеветтер В.Е. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. Л.; «Энергия», 1969.- 240 с.
14. Абрамов В.Д., Хомяков М.В. Эксплуатация изоляторов высокого напряжения. М., «Энергия», 1976.- 264 с.
15. Костюков Н.С., Минаков Н.В., Князев В.А. и др. Электрические изоляторы. Под ред. Н.С.Костюкова . М.:Энергоатомиздат, 1984.- 296 с.
16. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. Под общей ред.Д.В.Разевига. Изд. 2-е, пер. и доп. М., «Энергия», 1976.- 488 с.
17. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. /М.Бейер, В.Бек, К.Меллер, В.Цаенгль; Под ред. В.П.Ларионова. М.: Энергоатомиздат, 1989.- 555 с.
18. Александров Г.Н., Борисов В.В., Каплан Г.С. и др. Проектирование электрических аппаратов. Учебник для вузов /Под ред. Г.Н Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр.отд., 1985.- 448 с

19. Электрические свойства полимеров. Под ред. д.ф.-м.н. Б.И. Сажина. Изд. 2-е, пер. Л., «Химия», Ленингр.отд., 1977.-192 с.

20. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, Ленингр.отд., 1979.- 224 с.

21. Ануфриев Ю.А., Гусев В.Н., Смирнов В.Ф. Эксплуатационные характеристики и надежность электрических конденсаторов, М.; Энергия, 1976. – 224 с.

## Оглавление

Предисловие	3
Глава 1. Элементы теории вероятностей и математической статистики	4
1.1. Случайные события и их взаимосвязь	4
1.2. Числовые характеристики случайных величин	8
1.2.1. Математическое ожидание	8
1.2.2. Дисперсия	9
1.2.3. Теоремы о математических ожиданиях и дисперсии	9
1.2.4. Понятие о моментах	10
1.3. Основные понятия и показатели надежности	12
1.3.1. Количественные показатели надежности	12
1.3.2. Классификация отказов	16
1.4. Законы распределения отказов	18
1.5. Статистическая обработка данных	23
1.6. Установление закона распределения и определение его параметров	25
1.7. Проверка гипотез, критерии значимости и согласия	27
1.8. Критерий Согласия Пирсона - ( $\chi^2$ )	28
Глава 2. Электрическое поле в электроизоляционных конструкциях	29
2.1. Общие понятия об электрическом поле.	29
2.2. Аналитические методы определения характеристик электрического поля.	31
2.2.1. Использование дифференциальных уравнений	31
2.2.2. Способ эквивалентных зарядов	38
2.2.3. Метод конформных отображений	40
2.2.4. Особенности расчета электрического поля в реальных ЭИК	46
2.2.5. Регулирование электрического поля в ЭИК	47
2.3. Периодические несинусоидальные токи в электрических цепях	58
2.3.1. Свойства периодических кривых, обладающих симметрией	60
2.3.2. Графоаналитический метод определения гармоник ряда Фурье	61
Глава 3. Основы моделирования ЭИК	64
3.1. Условия работы электрической изоляции ЭИК и требования, предъявляемые к ней	64
3.1.1. Классификация электрической изоляции ЭИК	64
3.1.2. Условия работы и факторы, воздействующие на изоляцию	64
3.1.3. Требования, предъявляемые к ЭИК	71
3.2. Технические условия и расчетное задание	72
Глава 4. Моделирование и расчёт газовой изоляции	74
4.1. Расчет пробивного напряжения воздуха в равномерном и слабонеровном электрическом поле	76

4.2. Расчет пробивного напряжения воздуха в резконечномерном электрическом поле	77
4.3. Разряд на границе раздела двух сред	77
4.4. Разряд при загрязненной и увлажненной поверхности	79
Глава 5. Моделирование и расчет жидкой изоляции	81
5.1. Расчет пробивного напряжения жидких диэлектриков	82
5.2. Разряд на границе масло - твердый диэлектрик	83
5.3. Расчет пробивного напряжения маслобарьерной изоляции	84
Глава 6. Моделирование и расчет твердой ЭИ	86
6.1. Расчет пробивного напряжения при тепловом пробое	87
6.2. Моделирование и расчет комбинированной ЭИ	88
Глава 7. Основы теплового расчета ЭИК	95
7.1. Тепловыделение в токоведущих частях	97
7.2. Расчет температуроперепадов	100
7.3. Особенности теплового расчета высоковольтных вводов с бумажно-масляной изоляцией	106
7.4. Особенности теплового расчета вводов с маслобарьерной изоляцией	110
Глава 8. Основы механического и конструктивного расчета ЭИК	112
8.1. Механический расчет	112
8.1.1. Расчет фарфоровой крышки	112
8.1.2. Расчет узла крепления крышки и фланца к корпусу	114
8.2. Конструктивные расчеты	119
8.2.1. Расчет и конструирование ребер	119
8.2.2. Расчет маслорасширителя	120
8.2.3. Расчет экранов	125
8.2.4. Расчет ПИН (приспособления для измерения напряжения)	127
Глава 9. Расчет надежности ЭИК	128
9.1. Уравнение кривой жизни на основе термофлюктуационной теории	132
9.2. Уравнение кривой жизни с учетом частичных разрядов	134
9.3. Расчет времени до отказа при заданной вероятности безотказной работы $P(\tau)$	135
9.4. Частичные разряды и их роль при пробое твердых диэлектриков	140
9.5. Особенности расчета срока службы силовых конденсаторов	143
10. Особенности конструирования и расчета ЭИ кабелей, проводов, трансформаторов и др. ЭИК	146
10.1. Особенности расчета кабелей и проводов	147
10.2. Особенности расчета высоковольтных трансформаторов и электрических машин	148
Литература	150