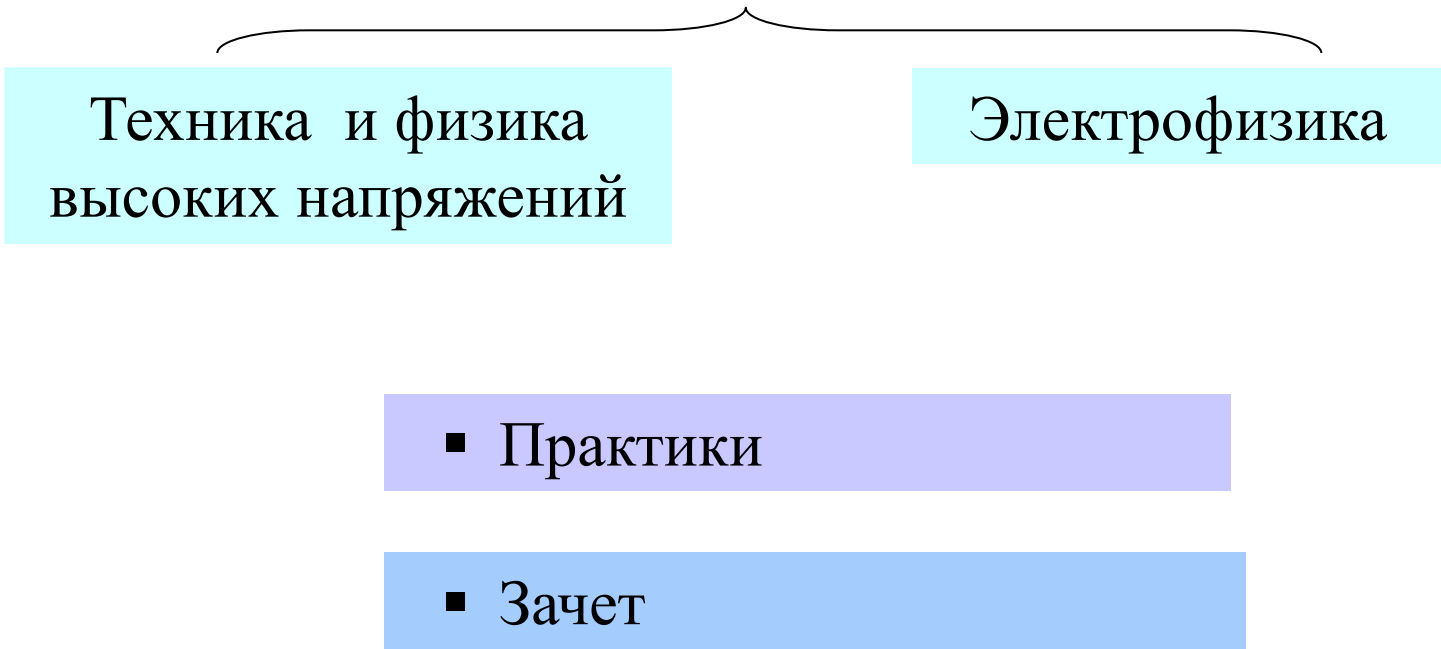




ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ЗАНЯТИЕ № 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ



Техника и физика
высоких напряжений

Электрофизика

- Практики

- Зачет

Классификация электрической изоляции

Изоляция токоведущих частей электрических аппаратов и конструкций:

- газовая,
- жидкая,
- твердая,
- комбинированная (состоящая из электроизоляционных материалов с различными диэлектрическими свойствами).

Газовая изоляция — электрическая изоляция и охлаждающая среда (воздух, элегаз, азот, водород, смеси газов). Для уменьшения габаритов конструкций с газовой изоляцией применяется повышенное давление.

Жидкая изоляция — электрическая изоляция, охлаждающая среда и технологическая среда в электрофизических установках (трансформаторное масло, конденсаторное масло, кабельное, касторовое масло, глицерин, синтетические жидкие диэлектрики). После пробоя и снятия напряжения жидкая изоляция восстанавливает свою прочность частично, так как пробои приводят к ухудшению ее характеристик.

Твердая изоляция – наряду с основной своей функцией призвана также воспринимать механические нагрузки, т.е. она выполняет роль конструкционного материала или механической опоры (фарфор, стекло, бумага, картон, гетинакс, текстолит, винипласт, резина, полиэтилен, капрон, эпоксидный компаунд и др.)

Комбинированная изоляция (бумажно-масляная, маслобарьерная и др.)— используется с целью увеличения электрической прочности и уменьшения габаритов конструкций. Пробой твердой или комбинированной изоляции – процесс необратимый, изоляция подлежит замене.

Изоляция электротехнических устройств

Однородная

Изоляция устройств с одним и тем же диэлектриком в объеме (газ).

Неоднородная

Изоляция с посторонними примесями и включениями, с различными слоями диэлектрика (комбинированная).

Изоляция электрооборудования

```
graph TD; A[Изоляция электрооборудования] --> B[Внутренняя]; A --> C[Внешняя];
```

Внутренняя

Твердая, жидкая, газообразная изоляция (или их комбинация) внутренних частей электрооборудования, не подвергающаяся непосредственному влиянию атмосферных и других видов внешних воздействий (загрязнение, увлажнение, воздействие животных). Особенность - старение (ухудшение характеристик в процессе эксплуатации).

Внешняя

Воздушные промежутки и поверхность твердой изоляции в атмосферном воздухе, которые подвергаются влиянию атмосферных и других внешних воздействий (загрязнение, увлажнение и т.п.) Они существенно затрудняют условия работы изоляции в открытой атмосфере.

Электрооборудование имеет **нормальную** изоляцию, если оно предназначено для применения в электроустановках, подвергающихся воздействию грозových перенапряжений при обычных мерах грозозащиты.

Электрооборудование с **облегченной** изоляцией предназначено для применения только в электроустановках, не подверженных воздействию грозových перенапряжений, или в установках, в которых грозовые перенапряжения не превышают амплитудного значения одноминутного испытательного напряжения.

Изоляция электрооборудования

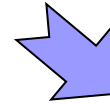
Надежность - свойство изоляции выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям эксплуатации.

Безотказность - свойство изоляции непрерывно сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Срок службы - календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала до наступления предельного состояния.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Электрические поля



Однородные

Вдоль силовых линий поля вектор напряженности сохраняет свое значение ($E = \text{const}$), а сами силовые линии параллельны друг другу. Пример однородного поля: поле плоского конденсатора с закругленными краями и бесконечно протяженными пластинами (электроды Роговского).

При $K \leq 2$ поле считается слабонеоднородным, а при $K > 3$ - резконеоднородным.

Неоднородные

Вектор напряженности вдоль силовых линий поля изменяется ($E - \text{var}$), а сами силовые линии, как правило, не параллельны.

Количественной мерой степени неоднородности электрического поля служит коэффициент неоднородности

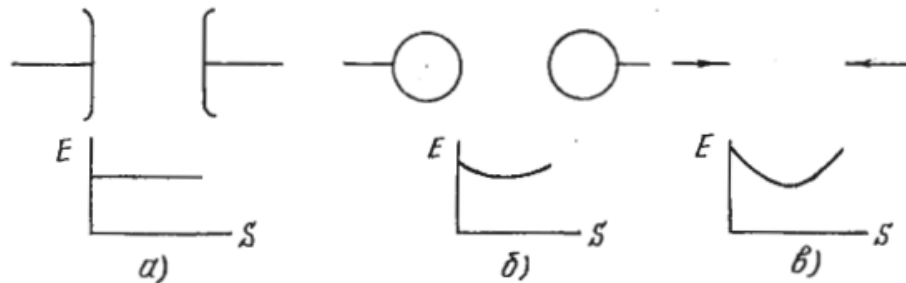
$$K = \frac{E_{\max}}{E_{\text{ср}}}$$

$E_{\max}$ и $E_{\text{ср}}$ — максимальная и средняя напряженности электрического поля

Электрические поля

Симметричные

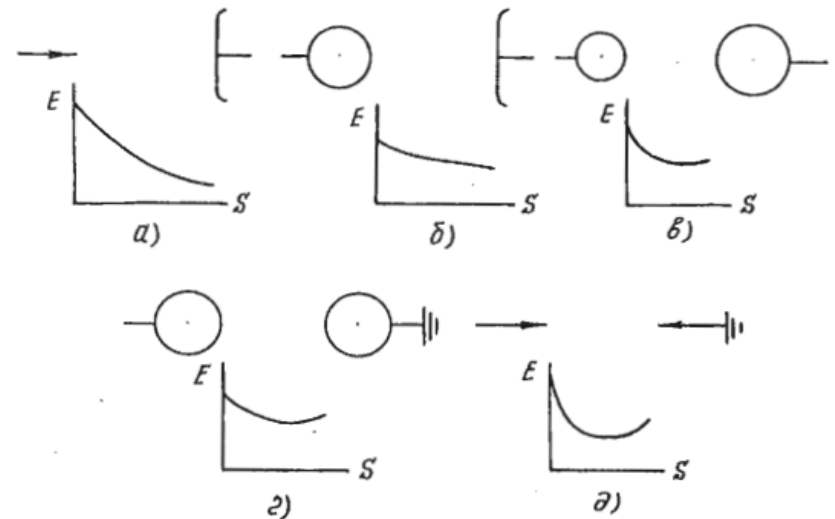
Поля между электродами одинаковой формы и размеров. Симметричные поля могут быть как однородными (а), так и неоднородными (б, в).



Электродные промежутки, образующие симметричные поля: а - плоскость - плоскость, б - шар - шар; в - острие - острие

Несимметричные

Поля между электродами различной формы и размеров (а,б,в), а также поля, у которых один электрод заземлен (г, д).



Электродные промежутки, образующие несимметричные поля: а - . острие - плоскость; б - шар - плоскость; в - шар - шар с разными диаметрами; г - шар - шар заземленный; д - острие - острие заземленное

- Чем меньше отличаются радиусы кривизны электродов, тем выше степень симметрии поля.

По рекомендации Международной электротехнической комиссии (МЭК) промежутки **плоскость - плоскость**, **острие - острие**, **острие - плоскость** и **шар - шар** считаются типовыми. Они охватывают большинство известных случаев работы электроизоляционных материалов в реальных конструкциях.

Плоскопараллельными называются поля, форма которых одинакова в параллельных плоскостях. Через каждую точку такой плоскости можно провести прямую, вдоль которой потенциал будет сохранять постоянное значение, т.е. $\varphi = f(x, y)$ (поле плоского конденсатора, кабеля, проводов линий электропередачи при пренебрежении их провесом). Плоскопараллельными могут быть как однородные, так и неоднородные поля.

Плоскомеридианными называются поля, в которых можно провести ряд секущих поверхностей, пересекающихся по одной линии (оси), в которых конфигурация электрического поля остается неизменной (поле подвешенного изолятора, поле шарового разрядника). Плоскомеридианное поле имеет форму тел вращения, оно всегда неоднородно и встречается наиболее часто. В цилиндрических координатах это поле может быть описано функцией, зависящей от двух координат, т.е. $\varphi = f(\rho, z)$

УСЛОВИЯ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ИЗОЛЯЦИИ

■ Условия работы и факторы, воздействующие на изоляцию

1. Воздействующие напряжения. Степень влияния напряжения на электрическую прочность и долговечность изоляции зависит от его амплитуды, длительности, формы.

При эксплуатации высоковольтных установок можно выделить три группы воздействующих напряжений:

- рабочее напряжение;
- внутренние (коммутационные) перенапряжения;
- атмосферные (грозовые) перенапряжения.

Рабочее напряжение воздействует на изоляцию высоковольтных конструкций в течение всего срока службы (20-30 лет). Величина этого напряжения устанавливается в соответствии с ГОСТ 1516.1-76 номинальным напряжением электрической сети и может отличаться от последнего, в зависимости от режима электропередачи, в большую или меньшую сторону. Величина наибольшего воздействующего напряжения для класса напряжения электрооборудования от 3 до 20 кВ определяется как

$$U = U_{\text{н}} + 20 \% U_{\text{н}},$$

где $U_{\text{н}}$ - номинальное напряжение электрической сети, кВ

Для классов напряжения 35-220 кВ

$$U = U_{\text{н}} + 15 \% U_{\text{н}},$$

Для классов напряжения 330 кВ

$$U = U_{\text{н}} + 10 \% U_{\text{н}},$$

Для классов напряжения 500 - 750 кВ

$$U = U_{\text{н}} + 5 \% U_{\text{н}},$$

Для классов напряжения 1150 кВ

$$U = U_{\text{н}} + 50 \text{ кВ}$$

При этом в изоляции не должно быть частичных разрядов, химических реакций и термических процессов, приводящих к ухудшению ее электрических и механических характеристик.

Внутренние перенапряжения (ВПН) возникают в электропередачах в результате нормальных коммутационных изменений режима или при аварийных процессах. Они носят статистический характер и разнообразны как по величине, так и по форме. Допуская некоторую условность, можно выделить **три группы перенапряжений**.

Группы перенапряжений

Первая группа. Наименьшие по амплитуде и наибольшие по длительности повышения напряжения промышленной частоты, которые наблюдаются при однофазных замыканиях на землю и внезапных сбросах нагрузки.

Совместное действие обеих причин может вызывать повышение напряжения на здоровых фазах до линейного длительною от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от режима нейтрали. Величина этих перенапряжений не должна превосходить длительно допускаемого напряжения на разряднике, при котором происходит гашение сопровождающего тока.

В соответствии с характеристиками отечественных вентильных разрядников кратность этих перенапряжений для классов 110-500 кВ не должна превышать $1,38U_{ф.н}$ (заземленная нейтраль) и $1,73 U_{ф.н}$ в сетях с компенсированной или незаземленной нейтралью ($U_{ф.н}$ - наибольшее фазное рабочее напряжение).

Вторая группа. К ней относятся перенапряжения при отключении ненагруженных линий, а также при различных резонансных явлениях. Величина амплитуды перенапряжений достигает $3 U_{ф.н}$ длительною 0,3-3 мс с частотой от 200 Гц до 10кГц.

Применение магнитно-вентильных разрядников, выключателей с шунтирующими сопротивлениями позволяет уменьшить кратность перенапряжений до $(2,2 - 2,5) U_{ф.н}$

Третья группа. Эти перенапряжения возникают при отключении ненагруженных трансформаторов. Кратность их может достигать $(3,5-4,0) U_{ф.н}$ при длительности до 100 мкс.

Величина воздействующих напряжений ограничивается вентильными разрядниками. Для внутренних перенапряжений уровень воздействующих напряжений оценивается:

$$U_{\text{возд.ВПН}} = 1,07 U_{\text{раз}} ,$$

где $U_{\text{раз}}$ - наибольшее пробивное напряжение разрядника при промышленной частоте; 1,07 - коэффициент, учитывающий статистический разброс пробивных напряжений разрядника.

Атмосферные перенапряжения (АПН) на изоляции электрооборудования возникают как при прямых ударах молнии в провод, так и при разряде молнии вблизи ЛЭП.

Защита оборудования от грозовых перенапряжений осуществляется молниезащитными тросами или стержневыми молниеотводами в сочетании с вентильными разрядниками. Ток и крутизна фронта тока молнии могут достигать больших значений (500 кА и 100 кА/мкс), поэтому вентильные разрядники не могут полностью защитить изоляцию от воздействия атмосферных перенапряжений.



При прямом ударе молнии в трос или опору на сопротивлении заземления и индуктивности опоры могут возникать большие потенциалы, которые при определенных условиях вызывают «обратные перекрытия» с опоры или троса на провод. При этом возникает импульс напряжения с очень крутым фронтом.

На подстанциях при $U > 110$ кВ воздушные промежутки имеют высокие разрядные характеристики. Поэтому «обратные перекрытия» здесь маловероятны, а изоляция подстанций подвержена воздействию набегающих грозовых волн. При существующей системе грозозащиты при $U < 220$ кВ изоляция ЛЭП выбирается исходя из атмосферных перенапряжений, так как внутренние перенапряжения для этой изоляции не являются определяющими вследствие относительно небольших амплитуд.

При $U > 220$ кВ внутренние перенапряжения являются основополагающими при выборе внешней изоляции устройств сверхвысокого напряжения, что связано с ростом амплитуд этих перенапряжений и возрастанием экономической важности проблемы координации изоляции. Атмосферные перенапряжения в этом случае будут определять межвитковую прочность внутренней изоляции трансформаторов и реакторов. Поэтому внешняя изоляция у аппаратов на $U > 220$ кВ будет определяться внутренними перенапряжениями. Верхний предел грозовых перенапряжений при разработанной системе грозозащиты ограничен.

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.

Величину воздействующего напряжения на **изоляцию ЛЭП и подстанций** при АПН для полной волны 1,2/50 можно рассчитать по формуле:

$$U_{\text{возд.АПН}} = 1,1U_{\text{раз.ост.}} + 15, \text{ кВ}_{\text{max}}$$

где $U_{\text{раз.ост.}}$ - остаточное напряжение на разряднике при токе молнии 5 кА для изоляции класса напряжения 110-220 кВ и при токе 10 кА - для класса 300-500 кВ; 1,1 - коэффициент разброса срабатывания разрядника; 15 кВ - учитывает превышение напряжения на защищаемом объекте по отношению к напряжению на вентильном разряднике за счет индуктивности ошиновки на участке между объектом и разрядником.

Для **силовых трансформаторов** с учетом возбуждения расчетный уровень воздействующих напряжений определится как

$$U_{\text{возд.АПН}} = 1,1U_{\text{раз.ост.}} + 15 + \frac{U_{\text{н}}}{2}, \text{ кВ}_{\text{max}}$$

Для коротких (срезанных) волн с учетом вольтсекундной характеристики разрядника уровень воздействующих напряжений для изоляции ЛЭП и подстанций

$$U_{\text{возд.АПН срез}} = K(1,1U_{\text{раз.ост.}} + 15),$$

где $K = 1,2$ - для изоляции класса напряжения 8-15 кВ; $K = 1,25$ - для изоляции классов 20-220 кВ.

Для силовых трансформаторов

$$U_{\text{возд.АПН срез}} = K(1,1U_{\text{раз.ост.}} + 15) + \frac{U_{\text{н}}}{2},$$

В России согласно уровню изоляции принято:

$$\frac{U_{\text{возд.АПН}}}{U_{\text{ф.н.}}} = 3,7 \text{ (для классов 110 – 220 кВ);}$$

$$\frac{U_{\text{возд.АПН}}}{U_{\text{ф.н.}}} = 3,2 \text{ (для классов 500 кВ);}$$

2. Электрические факторы. При нарушении нормального режима эксплуатации ЛЭП, приводящего к резкому увеличению напряжения, а также при ухудшении свойств изоляции, в связи с изменением окружающих условий, могут возникать корона, скользящие разряды, частичные разряды, трекинг, триинг, снижающие надежность и долговечность высоковольтных установок.

3. Механические факторы. Механические усилия в изоляции возникают как при нормальной работе (усилия при плановых коммутациях, электродинамические усилия между проводниками различных фаз, ветровые нагрузки и т.д.), так и в аварийных режимах (рост электродинамических сил между токоведущими частями аппаратов при коротких замыканиях).

4. Тепловые воздействия. Тепловые нагрузки в изоляции возникают из-за нагрева изоляции за счет тепла, выделяющегося в проводниках при протекании длительного номинального тока, а также за счет диэлектрических потерь в изоляции при приложении электрического поля.

При протекании токов короткого замыкания в аварийном режиме изоляция испытывает кратковременный перегрев («тепловой удар»).

5. Атмосферные воздействия. При эксплуатации в открытой атмосфере изоляция подвергается воздействию дождя, тумана, росы, снега, гололеда, природных и промышленных загрязнений, колебаний температуры, давления и т.д. Как правило, все эти факторы приводят к снижению электрической прочности изоляции, возникновению дополнительных механических нагрузок.

6. Фактор времени. С течением времени даже при нормальных условиях эксплуатации электроизоляционные и механические свойства изоляции постепенно ухудшаются, происходит «старение» изоляции. При этом большое влияние на скорость «старения» оказывает сочетание различных неблагоприятных факторов.

7. Воздействующие среды. При эксплуатации высоковольтных установок на изоляцию могут воздействовать агрессивные газы и жидкости, приводящие к преждевременному ухудшению ее свойств.

Выбирая тот или иной диэлектрик для заданной конструкции, необходимо учитывать, что вышеперечисленные факторы могут воздействовать во всевозможных комбинациях и оказывать дополнительное влияние на снижение электрических, механических и тепловых свойств изоляции.

■ Требования, предъявляемые к электрической изоляции

1. **Требования по электрической прочности.** Надежная и безаварийная работа высоковольтных аппаратов может быть обеспечена прежде всего при соблюдении следующих условий:

- Импульсная прочность изоляции должна быть выше расчетного уровня воздействующих напряжений при грозовых перенапряжениях с учетом защитного действия вентильных разрядников.
- Кратковременная электрическая прочность при воздействии внутренних перенапряжений должна быть выше амплитуды этих перенапряжений.
- Длительное воздействие рабочего напряжения, с учетом допустимого превышения номинального напряжения, не должно приводить к появлению частичных и скользящих разрядов, короны, трекинга и т.п.

Если попытаться в полной мере выполнить эти требования, а также требования по механической прочности и тепловой устойчивости, то можно создать надежную и долговечную изоляцию, но при этом она будет громоздкой и дорогой.

*Решение вышепоставленных вопросов непосредственно связано с **вопросами координации**, т.е. с согласованием характеристик защитной аппаратуры со свойствами изоляции. Комплексное решение этих вопросов позволяет выбрать так называемый **уровень изоляции**.*

Уровень изоляции означает такое качество изоляции, при котором она в состоянии выдерживать коммутационные перенапряжения заданной кратности относительно наибольшего фазного рабочего напряжения и импульсные воздействия, ограниченные соответствующими разрядниками.

Уровень изоляции определяет наименьшее разрядное напряжение, которое должны иметь высоковольтные конструкции. Под этим обычно понимают испытательные напряжения.

Таким напряжением для внешней изоляции при длительном воздействии напряжения промышленной частоты будет **мокроразрядное напряжение** ($U_{\text{мр}}$). **Коэффициент запаса электрической** изоляции при этом будет равен

$$K_{\text{зап}} = \frac{U_{\text{мр}}}{U_{\text{ф.н.}}}$$

Для $U > 330$ кВ уровень изоляции составляет $2,5 U_{\text{ф.н.}}$

В России результаты работы по координации изоляции закрепляются ГОСТ 1516-76, который устанавливает испытательные напряжения для каждого класса напряжения. Испытательное напряжение является некоторым эквивалентом воздействующих напряжений и выбирается с учетом характеристик вентильных разрядников.

Величина испытательного импульсного напряжения, являющаяся эквивалентом грозовых перенапряжений, определяется по формуле

$$U_{\text{исп.имп.}} = \frac{U_{\text{возд.АПН}}}{K_K},$$

где K_K - коэффициент кумулятивности при воздействии импульсов грозовых перенапряжений, учитывающий накопление дефекта. Для внешней изоляции $K_K=0,84$; для внутренней - $K_K=0,9$. $U_{\text{возд.АПН}}$ - расчетный уровень воздействующих грозовых перенапряжений, определяемый по формулам.

Испытания проводятся стандартными импульсами 1,2/50 мкс (полная волна), а также импульсами, срезанными при предразрядном времени 2-5 мкс

Одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты выбирается на основе расчетного уровня воздействующих коммутационных перенапряжений.

Для внешней изоляции:

а) под дождем

$$U_{\text{исп.д.}} = \frac{U_{\text{возд.ВПН}}}{K_{\text{и}} K_{\text{р}}},$$

где $K_{\text{и}}$ - коэффициент импульса ($K_{\text{и}}=1,1$); $K_{\text{р}}$ - коэффициент, учитывающий возможные изменения атмосферного давления ($K_{\text{р}}=0,94$ для высот до 1000 м); $U_{\text{возд.ВПН}}$ - расчетный уровень коммутационных перенапряжений, определяемый по формуле (слайд 13).

б) для сухой изоляции

$$U_{\text{исп.с.}} = \frac{U_{\text{возд.ВПН}}}{K_p}, \quad \text{где } K_p = 0,84.$$

Для внутренней изоляции:

$$U_{\text{исп}} = \frac{U_{\text{возд.ВПН}}}{K_{\text{и}} K_{\text{к}}}, \quad \text{где } K_{\text{и}} = 1,3 \text{ для } U = 3-35 \text{ кВ}; K_{\text{и}} = 1,35 \text{ для } U > 35 \text{ кВ}; K_{\text{к}} = 0,85-0,90.$$

Выбор $U_{\text{раб}}$ и $U_{\text{исп}}$ должен быть осуществлен таким образом, чтобы выполнялось условие:

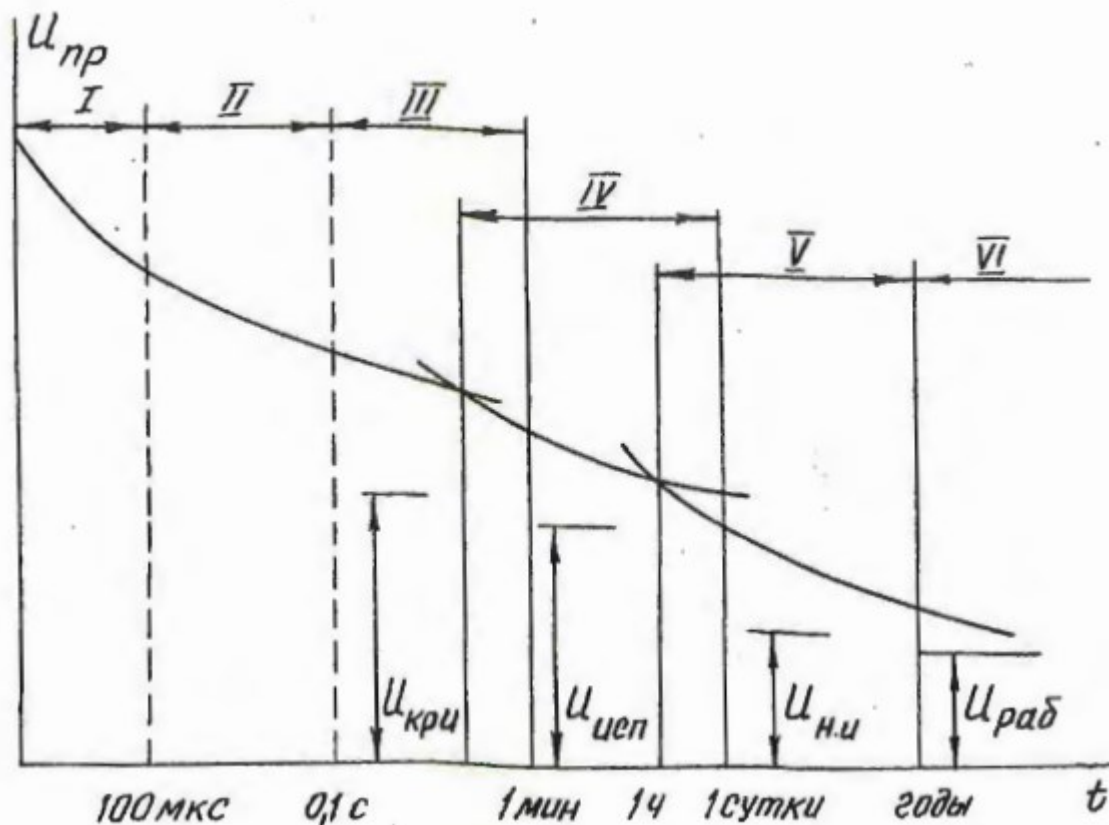
$$\begin{aligned} K_1 U_{\text{раб}} &\leq U_{\text{н.и}} \\ K_2 U_{\text{исп}} &\leq U_{\text{кр.и.}} \end{aligned}$$

где $U_{\text{н.и.}}$ - напряжение возникновения начальной ионизации;

$U_{\text{кр.и.}}$ - напряжение возникновения критической ионизации

Для бумажно-масляной изоляции $K_1 = 1,5$; $K_2 = 1,3$.

Обобщенная вольтсекундная характеристика изоляции (стилизована)



I - область импульсного электрического пробоя (воздействие АПН); II - область воздействия коммутационных импульсов (миллисекундный диапазон); III - электрический пробой в минутном диапазоне; IV - тепловой пробой; V - ионизационный пробой; VI - общее старение изоляции

Наличие такой зависимости помогает конструктору правильно выбрать $U_{\text{раб}}$ и $U_{\text{исп}}$ с учетом ионизационных процессов.

В общем виде **надежность изоляции** может быть **обеспечена** при выполнении условия:

$$U_{\text{раб}} < U_{\text{н.и.}} < U_{\text{исп}} < U_{\text{кр.и}}$$

Необходимо выбирать пробивное напряжение изоляции электрических аппаратов таким образом (ГОСТ 1516-76), чтобы оно было выше выдерживаемого напряжения внешней изоляции в сухом состоянии, так как пробой изоляции связан с более тяжелыми последствиями.

Выдерживаемое напряжение промышленной частоты - напряжение, которое должна выдерживать внешняя изоляция при плавном подъеме испытательного напряжения.

Для изоляторов с основной жидкой или бумажно-масляной изоляцией пробивное напряжение должно быть больше $U_{\text{исп}}$ изоляции в сухом состоянии не менее чем в 1,2 раза; для компаундонаполненных изоляторов - в 1,3; для остальных изоляторов - в 1,6.

Разрядное напряжение изоляторов в масле должно быть больше выдерживаемого (испытательного) напряжения внешней изоляции в сухом состоянии не менее чем в 1,2 раза. Для линейных изоляторов пробивное напряжение принимают в 1,4-1,5 раза больше выдерживаемого, которое примерно на 5% меньше сухоразрядного.

2. Требования по механической прочности. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) на напряжение до 35 кВ требуют, чтобы допустимая нагрузка на изолятор не превышала 1/3 разрушающей, т.е.

$$P_{\text{доп}} \leq \frac{1}{3} P_{\text{раз}}$$

На классы напряжения более 110 кВ в нашей стране нормы не установлены и они определяются техническими условиями на изделие, выпускаемое предприятием.

3. Требования по теплостойкости. Эти требования устанавливаются в связи с различными температурными коэффициентами твердой изоляции (фарфор, керамика) и арматуры. Изолятор погружают в воду с температурой 80-90°C на время $T = 15 + 0,7G$ (G - масса изолятора, кг), но не более 1 часа, а затем в воду с температурой 20-30°C. Такое испытание повторяется дважды.

4. Другие требования. Для изоляции, работающей в условиях тропического климата, выдвигается ряд дополнительных требований: стойкость к воздействию солнечной радиации в сочетании с повышенной влажностью и высокими температурами; плеснеустойчивость; устойчивость по отношению к насекомым и животным.

С учетом вышеперечисленных условий работы и требований в отношении надежной работы изоляции энергетических объектов при всех воздействиях и при одновременном обеспечении минимальных потерь, низкого уровня радиопомех и помех в высокочастотных каналах связи, а также с учетом обязательного обеспечения безопасной работы обслуживающего персонала рекомендуется выбор изоляции вести из условия получения **наибольшего народнохозяйственного эффекта** или **«минимума приведенных затрат»**

$$Z = KE_n + P + y = \min$$

где K - капитальные вложения;

E_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ($E_n > 0,12$ 1/год);

P - ежегодные расходы на покрытие потерь энергии в сетях, на эксплуатацию и на амортизацию;

y - ущерб, причиненный хозяйству, от нарушения электроснабжения.

Рабочая напряженность будет оптимальной при условии $Z = \min$.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ИЗОЛИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ

Основной характеристикой электрического поля в заданной точке является его **напряженность**.

Напряженность электрического поля E есть векторная величина, определяемая отношением силы F , действующей в поле на электрический заряд, к величине заряда Q , т.е.

$$E = \frac{F}{Q}, \quad B / м$$

Положительный потенциал данной точки электрического поля равен энергии, которую приобретает единичный положительный заряд при его перемещении внешними силами из точки с нулевым потенциалом в данную точку против действия сил электрического поля.

Нулевым потенциалом условно обладают точки, удаленные в бесконечность от заряда или заземленные.

Отрицательный потенциал характеризует расход энергии поля на перемещение единичного положительного заряда из точки с нулевым потенциалом в данную точку по направлению сил электрического поля.

Точки электрического поля, имеющие одинаковый потенциал, образуют эквипотенциальные поверхности.

Разность потенциалов двух точек электрического поля называется напряжением U между этими точками

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi, B$$

При этом напряженность электрического поля - скорость убывания (знак минус) потенциала по направлению силовых линий, перпендикулярных эквипотенциальным поверхностям на отрезке пути Δa

$$\bar{E} = -\frac{d\varphi}{da}, B/m$$

Градиент потенциала ($G, B/m$) - характеристика электрического поля, численно равная напряженности электрического поля, но имеющая противоположный знак

$$G = grad\varphi = -E = \frac{d\varphi}{da}, B/m$$

Для однородного электрического поля:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{da} = \frac{U}{a}, B/m$$

где a – толщина диэлектрика, м.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика (ϵ_a , Ф/м) - основная характеристика электрических свойств изоляционного материала, которая характеризует интенсивность процессов поляризации в диэлектрике, происходящих под действием внешнего электрического поля.

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon, \text{ Ф/м}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}, \text{ Ф/м}$$

Электрическое смещение или электрическая индукция $\bar{D}$ определяет действие электрического поля на диэлектрик

$$\bar{D} = \epsilon_0 \epsilon \bar{E}, \text{ Кл/м}^2$$

Электрическое смещение - плотность электрических зарядов на поверхности заряженного тела либо заряд, индуцируемый на единице проводящей поверхности 1 м^2 , внесенной в электрическое поле нормально к его силовым линиям.

Электрическая емкость:

$$C = \frac{I}{2\pi f C}, \text{ Ф}$$

Расчетные формулы емкости двух- и трехслойного конденсатора:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad C = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3}$$

Электрическое смещение и заряд в любом слое постоянны

$$D = E_1 \varepsilon a_1 = E_2 \varepsilon a_2 = E_n \varepsilon a_n,$$

$$Q = CU = C_1 U_1 = C_2 U_2$$

Для двухслойного конденсатора

$$E_1 = U \frac{\varepsilon_2}{d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1},$$

$$E_2 = U \frac{\varepsilon_1}{d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1},$$

при этом $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1},$

Емкость цилиндрического конденсатора:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{R}{r}},$$

где l - активная длина обкладок;

R, r – радиус наружной и внутренней обкладок.

Напряженность электрического поля в любой точке цилиндрического конденсатора:

$$E_x = \frac{U}{r_x \ln \frac{R}{r}},$$

где r_x -текущее значение радиуса.

Максимальная напряженность поля вблизи внутреннего цилиндра($r_x = r$):

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}},$$

Максимальная напряженность электрического поля вблизи поверхности внутреннего цилиндра минимальна, если $\frac{R}{r} = e = 2,718$

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} = \frac{U}{r \ln e} = \frac{U}{r}.$$

Минимальная напряженность вблизи наружного цилиндра ($r_X = R$):

$$E_{\min} = \frac{U}{R \ln \frac{R}{r}}$$

Напряженность электрического поля цилиндрического конденсатора со слоистой изоляцией на границе раздела двух сред изменяет свою величину скачкообразно.

Емкость **сферического конденсатора**:

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 Rr}{R-r}, \Phi$$

где R, r - радиус наружной и внутренней сферы, соответственно.

Максимальная напряженность электрического поля:

$$E_{\max} = U \frac{R}{r(R-r)}.$$

минимальная напряженность: $E_{\min} = U \frac{R}{R(R-r)}$.

Максимальная напряженность в сферическом конденсаторе имеет минимальное значение при $r = R/2$, тогда:

$$E_{\max} = \frac{4U}{R}.$$

Одиночную сферу, достаточно удаленную от заземленных частей, представляют как сферический конденсатор с радиусом $R = \infty$. Тогда расчетные формулы примут вид:

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 r, \Phi$$

$$E_{\max} = \frac{U}{r}, \text{ кВ/см.}$$

Для **плоского конденсатора сопротивление изоляции:**

$$R_{из} = \rho_v \frac{d}{S}, \text{ Ом.}$$

где ρ_v - удельное объемное сопротивление изоляции, Ом·м

d - расстояние между плоскими электродами, м

S - активная площадь обкладок, м².

Для цилиндрического конденсатора (кабеля):

$$R_{из} = \rho_V \frac{\ln \frac{R}{r}}{2\pi l}, \text{ Ом.}$$

где l – длина кабеля, м.

Для сферического конденсатора (при $R \gg r$): $R_{из} = \rho_V \frac{1}{4\pi r}, \text{ Ом.}$

Сопротивление изоляции плоского конденсатора на единицу длины:

$$R'_{из} = \rho_V \frac{dl}{S}, \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Емкость плоского конденсатора на единицу длины:

$$C' = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{dl}, \text{ Ф/м.}$$

Сопротивление изоляции кабеля на единицу длины:

$$R'_{из} = \rho_V \frac{\ln \frac{R}{r}}{2\pi}, \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Емкость цилиндрического конденсатора (кабеля) на единицу длины:

$$C' = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{R}{r}}, \quad \Phi / \text{м.}$$

Максимальную напряженность поля для промежутков различной конфигурации можно определить, используя приближенные методы расчета электрических полей.

Для промежутка “**шар - плоскость**”

$$E_{\max} = K \frac{U(r+d)}{r \cdot d},$$

Для промежутка “**шар - шар**”

$$E_{\max} = K \frac{U(r+0,5d)}{r \cdot d},$$

где K - поправочный коэффициент ($K=0,9$);

r - радиус сферического электрода;

d - расстояние между электродами.

Для промежутка “**цилиндр - плоскость**”

$$E_{\max} = K \frac{U}{r \ln \frac{r+d}{r}},$$

Для промежутка “**цилиндр-цилиндр**”

$$E_{\max} = K \frac{U}{2r \ln \frac{r+0,5d}{r}},$$

где r - радиус цилиндра; d - расстояние между электродами.