

- **3 Дәріс №3. Диэлектриктегі физикалық процесс.**
- **Диэлектрлік шығындар және диэлектриктардың тесілуі**
-
- **Дәріс мақсаты: диэлектрлік шығындар мен тесілулерді оқып үйрену.**
-

- **Диэлектрлік шығындар табиғаты**

-

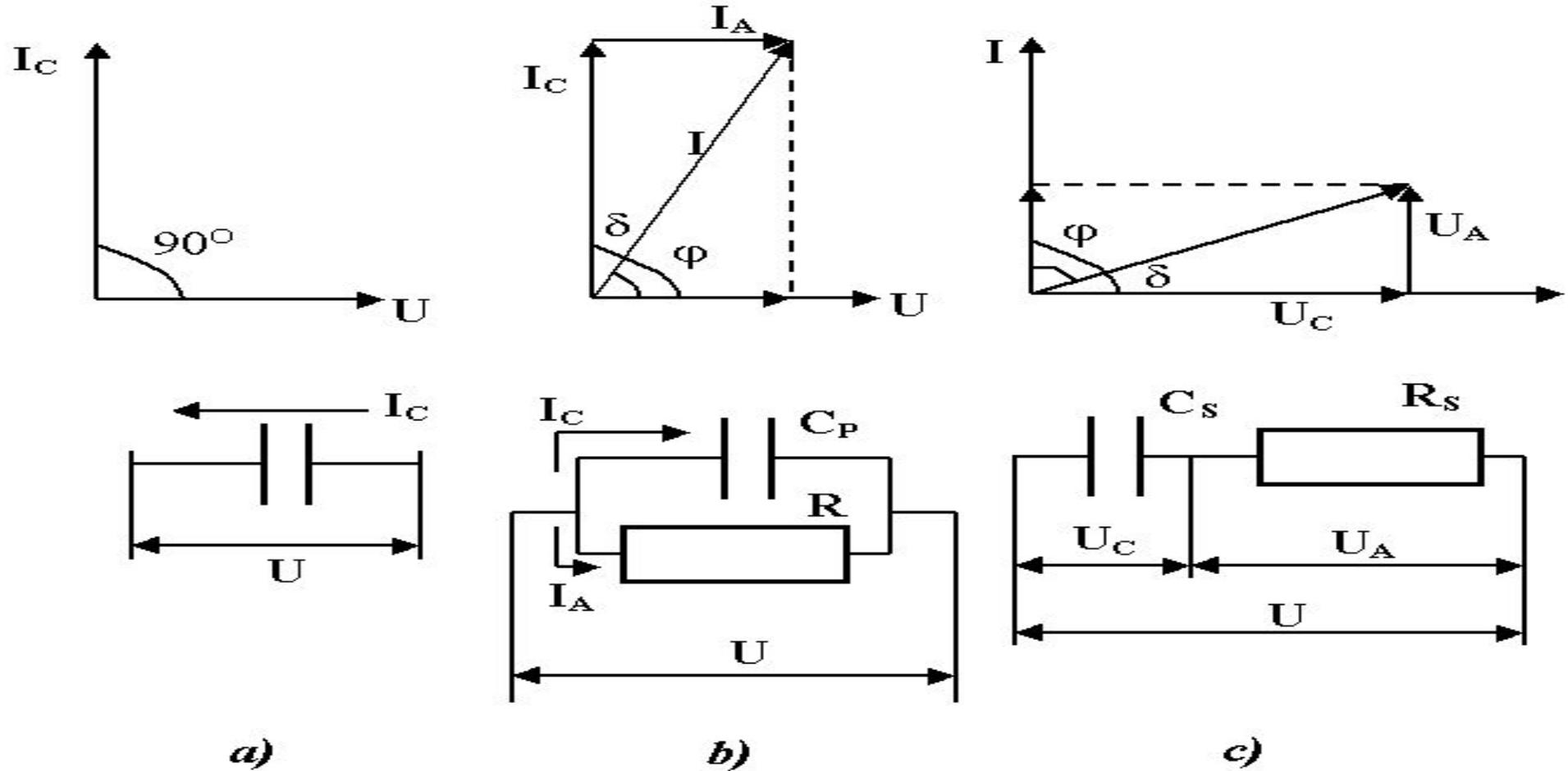
- Диэлектриктің шығындар деп диэлектриктің қызуын тудыратын электрлік өрістің әсерінен диэлектрикте уақыт бірлігінде таралатын энергияны айтады.

- Диэлектрикте шығындар айнымалы ток та да, тұрақты ток та да байқалады. Өйткені материалда өткізгіштікпен негізделген тура ток пайда болады. Тура өткізгіштік тогын актив ток деп атайды. Ол диэлектриктің қызуын тудырып, диэлектрлік шығындарды анықтайды. Тұрақты кернеу кезінде, периодты поляризация болмағанда, диэлектрик материалдың сапасы ρ_k және ρ_b кедергілерімен сипатталады. Айнымалы кернеу кезінде, тура электрөткізгіштіктен басқа, диэлектрикте энергия жоғалтуына әкеліп соғатын себептер пайда болады.

- Диэлектриктегі шығындар шамасы таралатын қуаттың көлем бірлігіне қатынасымен, яғни меншікті шығынмен сипатталады. Энергияны тарататын қасиетін анықтайтын диэлектрикті сипаттау үшін көбінесе диэлектрлік шығындар бұрышымен δ және диэлектрлік шығын бұрышының тангенсімен $\operatorname{tg}\delta$ қолданады.
- Диэлектрлік шығындар бұрышы δ деп актив – сыйымдылықты тізбекте ток пен кернеу арасындағы фазалар ығысуын ϕ 90° -қа толықтыратын бұрышты айтады.

- Идеал диэлектрик болған жағдайда диэлектрик арқылы тек ығысу тогы жүреді. Өткізгіштік ток 0-ге тең. Бұл жағдайда $\delta = 0^\circ$ және $\phi = 90^\circ$. Диэлектрик энергияны неғұрлым көп таратса, ϕ бұрышы соғұрлым аз және δ бұрышы соғұрлым көп. Оқшауламада үлкен диэлектрлік шығынды қатты жылыту тудырады, және де жылулық жойылуға әкеліп соға алады. Диэлектрлік шығындардың табиғаты әртүрлі және заттың агрегаттық күйіне байланысты: газ, сұйық, қатты.

Шығындар мен шығынсыз векторлық диаграмалар және диэлектриктің шығынмен және шығынсыз алмасу сұлбасы (а, б, в).



Диэлектриктегі қосынды ток:

$$I = I_c + I_a. \quad (3.1)$$

мұндағы I_c - сыйымдылықты құраушы;
 I_a - актив құраушы.

Токтардың векторлық диаграммасы бойынша айнымалы кернеу кезінде диэлектрлік шығындар формуласы:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (3.2)$$

мұндағы P – диэлектрлік шығындар, Вт;

U – кернеу, В;

ω – бұрыштық жиілік, с^{-1} ;

C – сыйымдылық, Ф.

Анықтамаға сай, $\operatorname{tg} \delta$ актив токтың реактив токқа қатынасына тең. Токтарды кернеудің кедергіге қатынасымен алмастыра отырып, келесі формуланы аламыз:

$$\operatorname{tg} \delta = 1 / \omega C_p R. \quad (3.3)$$

- **Диэлектрлік шығындардың түрлері**
-
- Диэлектрлік шығындарды ерекшеліктері және физиалық табиғаты бойынша төрт негізгі топқа бөлуге болады:
- а) поляризациямен негізделген диэлектрлік шығындар;
- б) тура электрөткізгіштіктің диэлектрлік шығыны;
- в) құрылымның әртектігімен негізделген диэлектрлік шығындар;
- г) иондалған диэлектрлік шығындар.
-

4 Диэлектриктерді тесіп өту

Электр өрісіне қосқан диэлектриктің электродтарының арасындағы потенциалдар айырымы белгілі мәнге жеткенде, диэлектрикті тоқпен тесіп өтеді. Сонда диэлектрик тоқ өткізеді және электр тізбегінен айыратын қасиетін жоғалтады. Тесіп өткен кездегі кернеу- тескіш кернеу (U_T). Бірыңғай өрістегі электр беріктігі тескіш кернеулікке (E_T) тең. Ол мына формуламен есептеледі

$$E_T = U_t / d(B / m), \quad (3.6)$$

мұнда U_t – тескіш кернеу;

d – қалыңдық, не болмаса екі электродтың арасы.

СИ жүйесінде E_T В/м-мен өлшенеді; бірақ практикалық есептеулер үшін ыңғайлы өлшеу бірлігі болып кВ/мм саналады: $1 \text{ В/м} = 10^{-6} \text{ кВ/мм}$.

- Қатты диэлектриктің бетіндегі ауадағы разряд беттік тесу деп аталады. Беттік разрядтың шамасына электродтар мен диэлектриктердің конфигурациясымен негізделген, электр өрісінің формасы, айнымалы токтың жиілігі, диэлектриктің бетінің жағдайы, ауаның қысымы әсер етеді.

- Газ және сұйық диэлектриктерде тесу кезінде молекулалардың қозғалысы әсерінен, U кернеуінен кейін тесілген бөлік өзінің бастапқы қасиеттерін қалпына келтіреді.

- Қатты диэлектриктерді тескен кезде дұрыс емес формалы тесілген, күйдірілген немесе балқытылған тесік ретінде ізі қалады. Жалғастыратын іздердің пайда болуымен байланысқан қатты диэлектриктің бетін бұзу трекинг деп аталады.

- Жоғары кернеулікті E электр өрісінің жалғастырылған әсері диэлектриктердегі қайтпайтын процесстерге әкеліп соғады. Нәтижесінде оның U_T төмендейді, яғни оқшауламаның электр тозуы болады. Осындай тозудың әсерінен оқшауламаның жұмыс істеу мерзімі азаяды. U_T -дің U кернеуді беру уақытына тәуелділігі бейнеленген қисықты электр оқшауламаның өмір қисығы деп атайды.

- Диэлектриктердің электр беріктілігі агрегаттық күйіне, химиялық құрамына, заттың құрылысына және сыртқы факторлардың әсерлеріне тәуелді.
- Газ, сұйық, қатты диэлектриктерді тесу механизмі әртүрлі болады.

- **Пробой газов.**

-

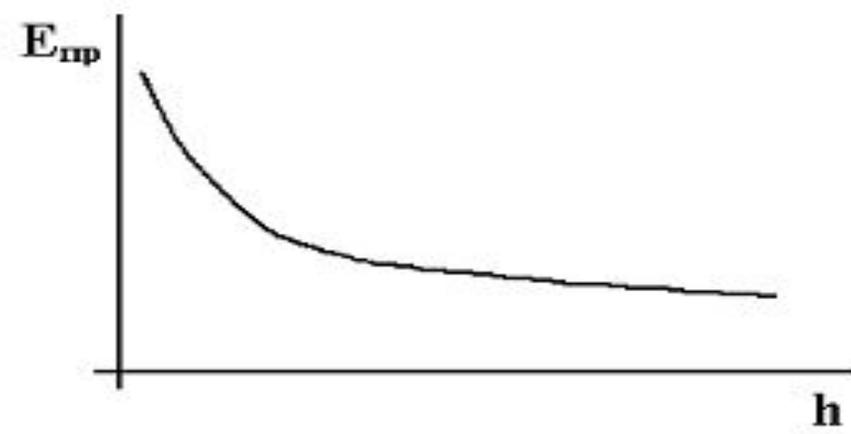
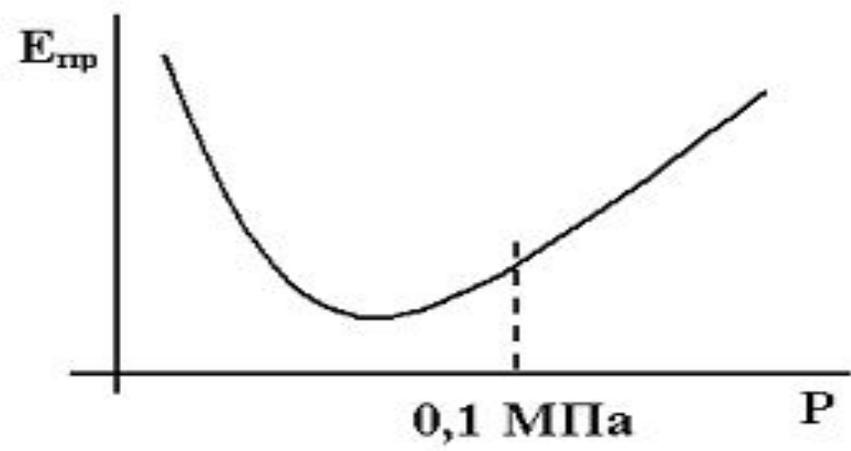
- Число электронов, образующихся в 1 сек. В 1 см³ воздуха под действием радиоактивности Земли или космических лучей, составляет от 10 до 20. Эти электроны являются начальными зарядами, приводящими к пробоею газа в достаточно сильном поле.

- При увеличении E электроны между двумя соударениями приобретают энергию $W=e\lambda E$

- достаточную для ионизации молекул газа $W > W_{и}$, где $W_{и}$ – энергия ионизации, e – заряд электрона, λ – длина свободного пробега.
- При столкновении с атомами и молекулами они порождают новые электроны. При этом «вторичные» электроны под действием поля, в свою очередь, вызывают ионизацию молекул газа. В результате, число электронов в газовом промежутке увеличивается лавинообразно. Интенсивность этого процесса определяется **коэффициентом ударной ионизации** α , равным числу ионизации электронов на единицу длины пути. Эти электроны распределяются в межэлектродном пространстве, образуя **электронную лавину**.

- Пробой газов определяется двумя механизмами - лавинным и лавинно-стримерным, связанными с процессами ударной ионизации электронами и фотоионизацией. Для пробоя газа в постоянном однородном поле (рис. 4.2) характерна зависимость $E_{пр}$ от давления. Давление 0,1 МПа соответствует нормальному атмосферному давлению. $E_{пр}$ при больших давлениях растет в связи с уменьшением длины свободного пробега электронов и уменьшением вероятности актов ионизации; возрастание $E_{пр}$ при малых давлениях связано с уменьшением вероятности столкновения электронов с молекулами газа из-за малой плотности газа. $E_{пр}$ воздуха в однородном поле растет, как показано на рис. 4.3 с уменьшением расстояния между электродами из-за уменьшения вероятности столкновения электронов с молекулами газа.





- Пробивное напряжение газов существенно снижается в неоднородных полях, например для воздуха при $h=1$ см от 30 кВ до 9 кВ. В неоднородном поле влияет также полярность электродов. Так для электродов с малым радиусом кривизны $U_{пр}$ при положительной полярности оказывается меньше, чем при отрицательной. Это связано с образованием положительного объемного заряда у острия в результате развития **коронного** разряда, что приводит к возрастанию напряженности поля в остальной части промежутка.

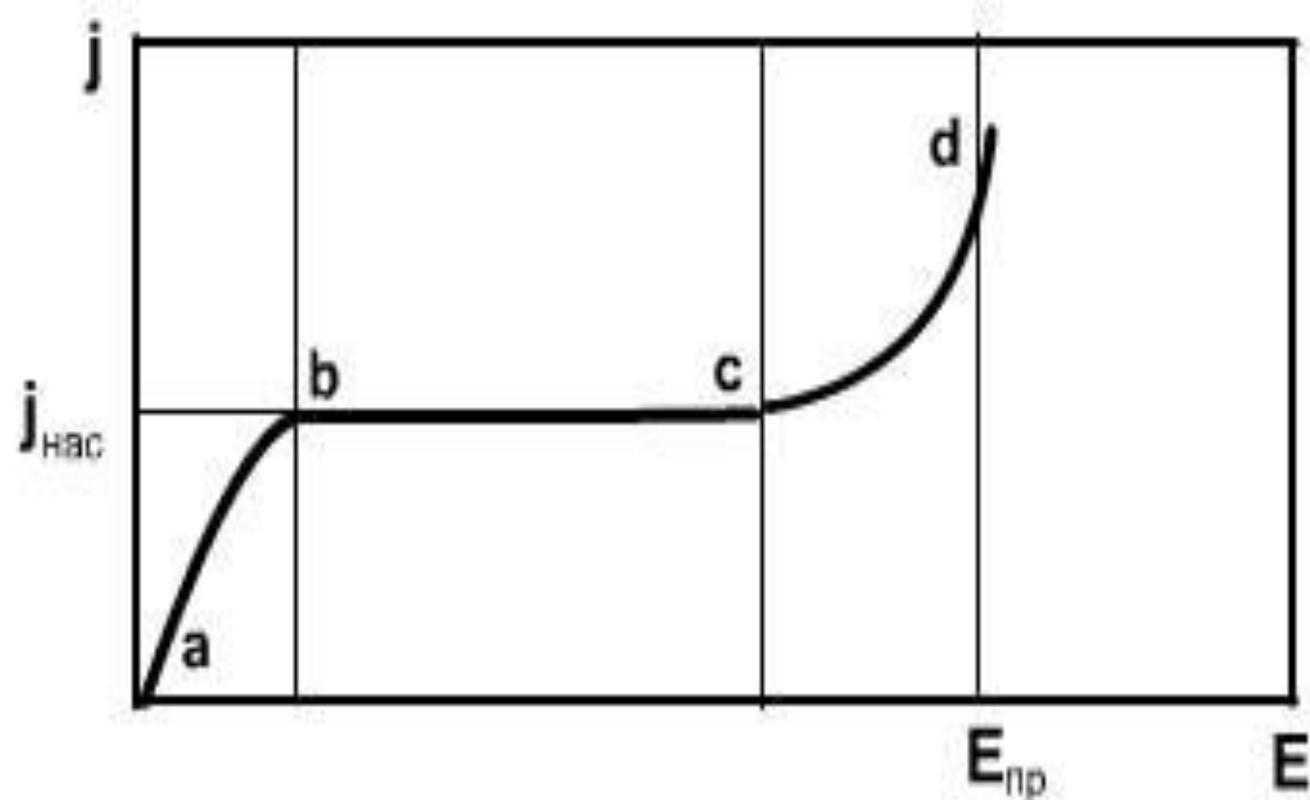


Рис. 3.3. Вольт-амперная характеристика газообразного диэлектрика:

ab – область слабых полей, закон Ома;

bc – область средних полей, насыщение;

cd – область сильных полей, ударная ионизация.

- На участке bc (насыщение) скорость носителей заряда возрастает настолько, что они не успевают рекомбинировать и почти все достигают электродов ($j_{нас} = 10^{-14} - 10^{-16} \text{ А/м}^2$). Разряд на участке abc называют несамостоятельным.

- Несамостоятельная электропроводность осуществляется за счет ионов и электронов, образующихся в результате ионизации, вызванной внешним энергетическим воздействием, таким как космические и солнечные лучи, радиоактивное излучение Земли. На участке cd начинается ударная ионизация молекул электронами. Это область сильных полей (для воздуха $E > 10^6$ В/м). При напряженности E газ пробивается (самостоятельный разряд). Возрастание тока при $E > E_{кр}$ (участок cd) обусловлено увеличением числа носителей заряда в результате электронной ударной ионизации, и холодной эмиссии электронов из катода. При E наступает пробой, в этом состоянии газ (воздух) утрачивает свои электроизоляционные свойства, так как между электродами образуется плазменный газоразрядный канал проводимости.

- **Пробой жидких диэлектриков**

-

- Жидкие диэлектрики обладают более высокой электрической прочностью, чем газы в нормальных условиях. Более высокая прочность жидких диэлектриков обусловлена их более высокой плотностью (в 2000 раз) и значительно меньшими межмолекулярными расстояниями.
- Предельно чистые жидкости получить чрезвычайно трудно. Постоянными примесями в жидкости являются вода, газы и мельчайшие механические частицы. Наличие примесей сильно осложняет явление пробоя жидких диэлектриков.

- В жидких диэлектриках возможны следующие виды пробоя:
- *электрический*, вследствие ударной ионизации;
- *тепловой* пробой при резко возрастающих диэлектрических потерях и нагрева жидкости в местах наибольшего скопления примесей;
- *ионизационный*, вследствие ионизации газовых включений жидкости, роста диэлектрических потерь

- **Пробой жидких диэлектриков**

- Электрическая форма пробоя, развивающаяся за время 10^{-5} - 10^{-8} с, наблюдается в тщательно очищенных жидких диэлектриках и связывается с инжекцией электронов с катода. $E_{пр}$ при этом достигает 10^7 В/м, В технически чистых жидких диэлектриках пробой носит тепловой характер.
- На электрический пробой жидких диэлектриков влияют многие факторы, числу которых относятся материал электродов, примеси, загрязнение жидкости; дегазация жидкости и электродов; длительность воздействия напряжения; скорость возрастания напряжения и его частоты; температура, давление и др.

- В неочищенных жидкостях пробивное напряжение определяется действующим значением (тепловой характер пробоя), в очищенных-амплитудным (электрическая форма пробоя). Более сильное влияние примесей и загрязнений как жидких, так и газообразных сказывается на низких частотах. Увеличение электрической прочности трансформаторного масла происходит при фильтрации и сушке (при частоте 50 Гц- втрое, на частоте 10^5 Гц- только на 30%).
- Для многих жидкостей в зависимости пробивного напряжения от температуры имеется максимум при температурах 30-80°C, высота которого уменьшается с ростом частоты (в пределах 0,4-12 МГц). Кривая тангенса угла диэлектрических потерь при температуре максимума проходит через минимум.
- Увеличение давления от 60 до 800 мм. рт. ст.

- **Пробой твердых диэлектриков**

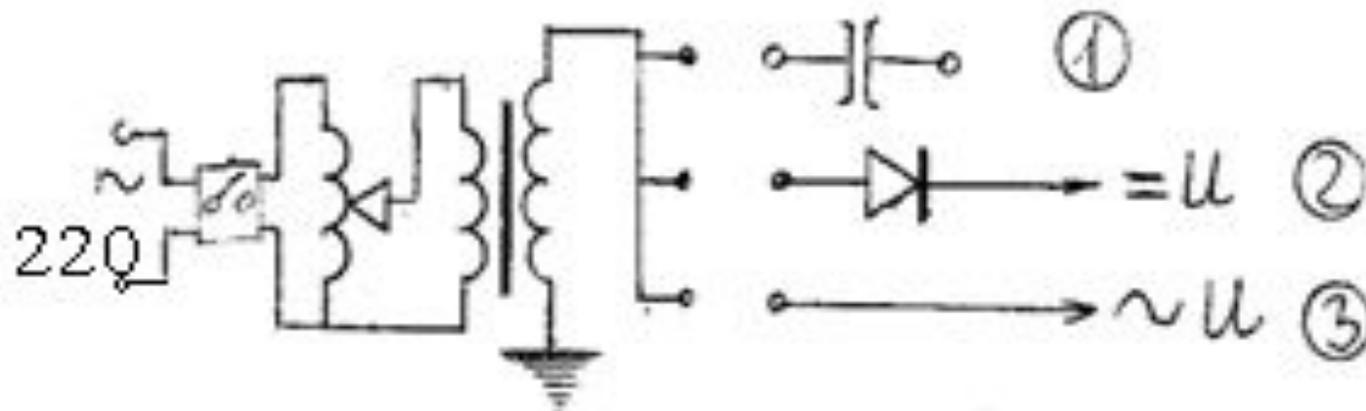
-

- Физическая картина пробоя твердых диэлектриков может быть весьма различна: ионизационные процессы; вторичные процессы, обусловленные сильным электрическим полем E ; нагрев; химические реакции; частичные разряды; механические напряжения в результате электрострикции; образования объемных зарядов на границах неоднородностей и т.д. Поэтому различают несколько механизмов пробоя твердых диэлектриков:

- - электрический
- - тепловой
- - электрохимический
- - ионизационный
- - электромеханический

Методы экспериментального определения электрической прочности

Электрическая прочность жидких и твердых диэлектриков определяется на установках типа АИИ - 70, позволяющих производить испытания на постоянном и переменном U в пределах от 0 до 70 кВ. Принципиальная схема электрических соединений установки АИИ - 70 дана на рисунке 5.3



- 1 - резервуар с электродами для испытания жидких диэлектриков;
- 2 - вывод постоянного U для испытания твердых диэлектриков;
- 3 - вывод переменного U для испытания твердых диэлектриков.

Рисунок 5.3 - Электрическая схема испытательной установки АИИ - 70

- **Пробивное напряжение и электрическая прочность**
- Минимальное напряжение $U_{пр}$, приложенное к диэлектрику, и приводящее к образованию в нем проводящего канала, называется пробивным напряжением. В зависимости от того замыкает канал или нет оба электрода пробой может быть **полным, неполным** или **частичным**.

- У твердых диэлектриков возможен также **поверхностный пробой**, после которого повреждается поверхность, образуя так называемый **трекинг**, науглероженный след на органических диэлектриках. Отношение импульсного пробивного напряжения к его статическому больше единицы и называется **коэффициентом импульса**. Зависимость пробивного напряжения от времени приложения напряжения называют **кривой жизни электрической изоляции**.

- Снижение $U_{пр}$ от времени происходит из-за **электрического старения** изоляции - необратимых процессов под действием тепла и электрического поля.
- **Электрической прочностью** называют напряженность электрического поля при пробое изоляции в однородном электрическом поле $E_{пр} = U_{пр} / h$, где $E_{пр}$, В/м,
- $U_{пр}$ - пробивное напряжение, В, h - толщина диэлектрика, м. Кроме В/м электрическую прочность часто выражают в МВ/м или кВ/мм. Соотношение между этими единицами такое: 10^6 В/м = 1 МВ/м = 1 кВ/мм.

- **Электрический пробой** - разрушение диэлектрика, обусловленное ударной ионизацией электронами или разрывом связей между атомами, ионами или молекулами в течение 10^{-5} - 10^{-6} с. $E_{пр}$ при электрическом пробое зависит главным образом от внутреннего строения диэлектрика и практически не зависит от температуры, частоты приложенного напряжения, геометрических размеров образца, вплоть до толщин 10^{-4} - 10^{-5} см. По сравнению с воздухом, у которого $E_{пр} \gg 3$ МВ/м, наибольших значений при электрическом пробое достигает $E_{пр}$ у твердых диэлектриков - 10^2 - 10^3 МВ/м, в то время как у тщательно очищенных жидких диэлектриков составляет примерно 10^2 МВ/м.

- **Электротепловой пробой**

- Электротепловой (тепловой) пробой возможен, когда выделяющееся в диэлектрике за счет электропроводности или диэлектрических потерь тепло - Q_1 становится больше отводимой теплоты - Q_2 . В результате в месте пробоя происходит прогрессирующий разогрев диэлектрика, сопровождающийся образованием узкого проплавленного канала высокой проводимости.

- Если не учитывать распределение температуры по толщине диэлектрика, то можно легко получить приближенное выражение для анализа зависимости $U_{пр}$ от влияния различных факторов. Пусть

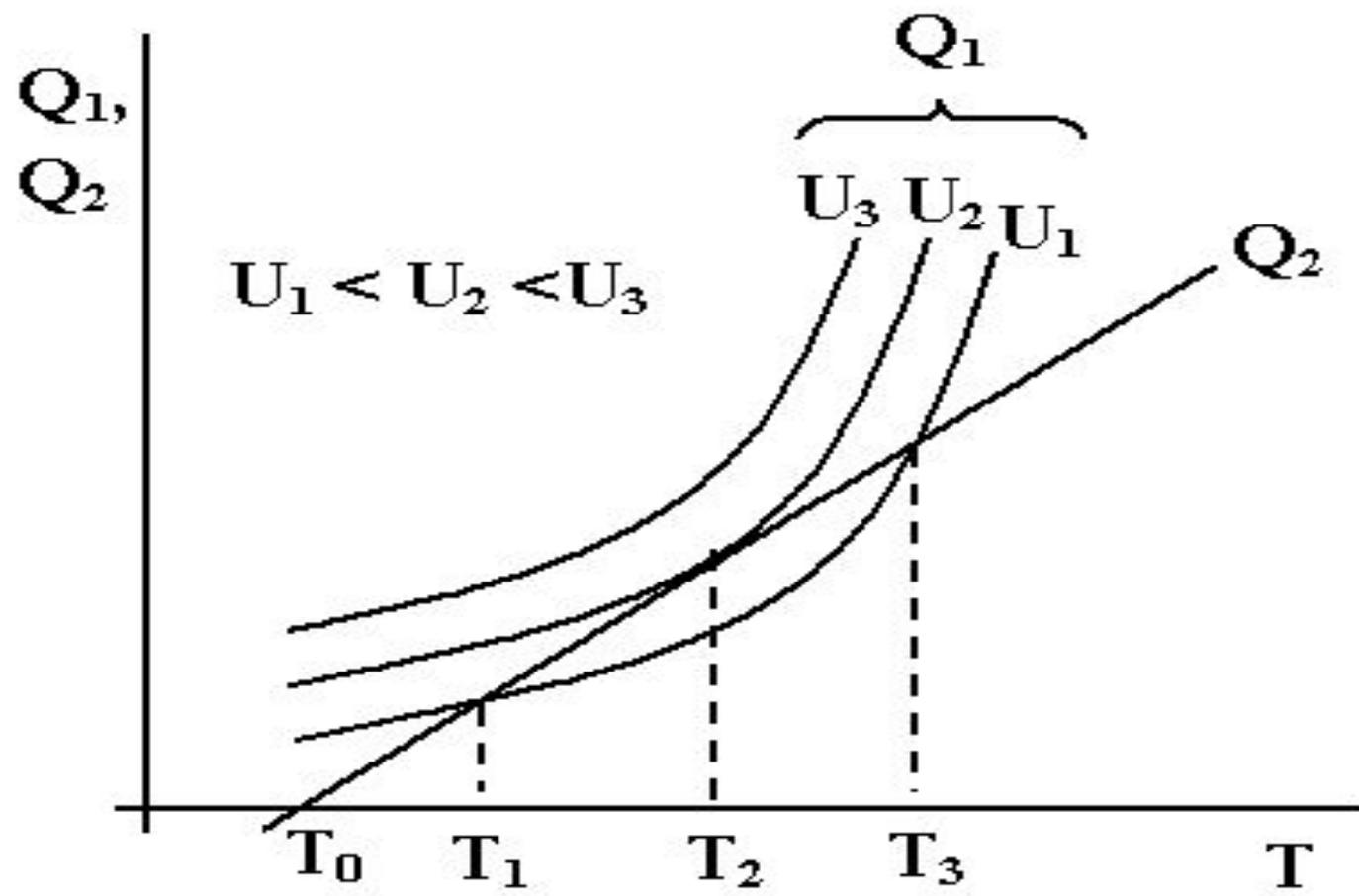
- $$Q_1 = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (4.1)$$

- Если в диэлектрике будут только потери проводимости (неполярный диэлектрик), то $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 \exp[a(T - T_0)],$

- где a и $\operatorname{tg} \delta_0$ зависят от природы диэлектрика, T_0 - температура окружающей среды (электродов), T - температура диэлектрика. Количество отводимого тепла определяется равенством

- $$Q_2 = 2\sigma S(T - T_0) \quad (4.2)$$

- где σ - суммарный коэффициент теплоотвода от диэлектрика в окружающую среду, S - площадь электрода.



- Из графического представления зависимости Q_1 и Q_2 от температуры (рис. 4.1) видно, что при U_1 и T_1 будет устойчивое тепловое равновесие $Q_1 = Q_2$; при U_2, T_2 и U_1, T_3 - состояние неустойчивого теплового равновесия, при нарушении которого в результате прогрессивного разогрева диэлектрика будет тепловой пробой. Видно, что $U_3 = U_{пр}$. Из условия теплового равновесия

- $$U_{пр} = \sqrt{\frac{2\sigma S (T_{кр} - T_0)}{2\pi f C \operatorname{tg}\delta_0}} \cdot \exp[-a(T_{кр} - T_0)/2],$$

- где $T_{кр}$ соответствует температуры T_2 и T_3 .

- Тепловой пробой обычно происходит в течение $10^{-2} - 10^{-3}$ с, а $E_{пр}$ около 10 МВ/м.

- Пробой диэлектрика при тепловом пробое происходит там, где хуже всего теплоотдача. $E_{пр}$ при тепловом пробое уменьшается: при увеличении температуры, времени выдержки образца под напряжением; при увеличении толщины диэлектрика из-за ухудшения теплоотвода от внутренних слоев

- **Электрохимический пробой**

- происходит при напряжениях меньших электрической прочности диэлектрика. Вызывается изменением химического состава и структуры диэлектрика в результате электрического старения. Время развития этого вида пробоя $10^3 - 10^8$ с.