

## Villamos szigetelések és berendezések ZH kérdések kidolgozása

### Szabadvezetékek és kábelek

#### 1. Ismertesse a nagyfeszültségű szabadvezetékek felépítését, kitérve az egyes komponensek tulajdonságaira!

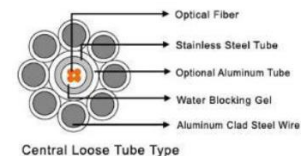
A nagyfeszültségű szabadvezetékek alapvetően a következő komponensekből állnak: alapozás és oszlop (együttesen szerkezet), szigetelők, koronagyűrű/ív húzó szarv, fázisvezetők, védővezető(k), rezgéscsillapítók és légi akadály-jelzők.

Az alapozásnak meg kell tartania és át kell adnia a földnek az önsúly, rátett súlyok, szélterhelés és egyéb által alkotott kombinált terhelését. Nem engedhető meg a mozgása, tervezésében a talaj jellemzői meghatározók, kivitelezése alapvetően építőmérnöki feladat.

Az oszlopnak illeszkedni kell a vezeték mechanikai és villamos tulajdonságaihoz, mint például a szigetelők hossza, elhelyezkedése, vagy a mechanikai terhelések. Ki kell állnia további a sodronyból feszítés, szélteher, jégteher és szeizmikus terhelések által származó terheléseket. Tipikus kialakításai a tartóoszlop, feszítőoszlop vagy a végfeszítő.

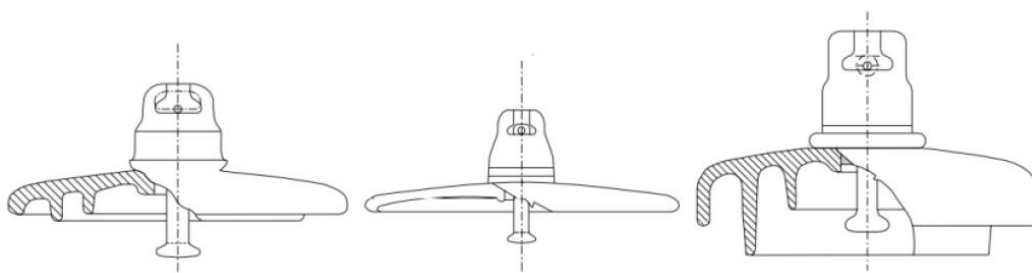
A vezetők legfontosabb mechanikai jellemzői az önsúly, és a szél-, hó-, jégteher, villamos jellemzői közül pedig az áramterhelhetőség a legfontosabb. Minden jellemzője függ a környezettől, pontosabban például a következőktől: hőmérséklet, szélsébség, napsugárzás, eső, páratartalom, magasság, jég és hó, szennyezések vagy villámcsapás. Leggyakrabban használt típusuk az ACSR (aluminium alloy conductors steel reinforced), azaz az alumíniumötvözet vezető acél erősítéssel. Ennek az alumínium miatt kiváló villamos tulajdonságai vannak, az acél miatt pedig jó mechanikai ellenállóképességgel rendelkezik. Lehetnek egyszeresek és kötegelt. A kötegelt vezetők csökkentik a koronakisüléseket a kisebb felületi villamos térerősség miatt, növelik az átviteli kapacitást, ugyanis azonos keresztmetszethez képest nagyobb felületen képesek hőt leadni, 220 kV-on és felette mindig alkalmazzák néhol többszörösen is, 756 kV esetén például akár 8-szoros kötegelés is elképzelhető.

A védővezetők fő feladata a fázisvezetők megóvása a közvetlen villámcsapástól, emiatt képesnek kell lennie levezetni a villámáramot a földbe az oszlopon át. Manapság egy speciális típusát, az OPGW-t alkalmazzák, melynek magjában optikai szál húzódik.



#### 2. Ismertesse a szabadvezetési szigetelők típusait és a legfontosabb jelenségeket, melyek a tervezésben szerepet játszanak! Részletezze a szabadvezetési kompozit szigetelők felépítését, előnyeit és alkalmazási problémáit!

A szabadvezetési szigetelők legfontosabb típusai a keramikai (porcelán és üveg), illetve polimer/kompozit szigetelők. Felületek kültéren és beltéren egyaránt ki van téve a környezeti hatásoknak, melyek következményeként a szigetelőtervezés legfontosabb korlátja a szennyezettség miatti átívelés. A szigetelők mechanikai kötéseit cinkkel bevont vastüskék adják. A tartószigetelők tipikus keresztmetszetei a következők: standard, nyitott profilú (öntisztító) és köd ellen védett (DC).



Mind a porcelán, mind az üveg jól ellenáll a felületi kisételeknek és igen jól viselik az összenyomást. A szigetelők alapvetően megbízható és hosszú élettartamú eszközök. A porcelánszigetelőket egysapkás szigetelőegységnek, tömör és üreges állószigetelőnek, hálózati tartószigetelőnek, hosszúrúd szigetelőnek vagy átvezető szigetelőnek szokás alkalmazni. Gyártási technológiáját tekintve a zománczott felület miatt jobb villamos tulajdonságokkal bír. Az üvegszigetelőket egysapkás szigetelőegységnek vagy többnyőrös tartószigetelőnek alkalmazzák. Technológiáját tekintve termikusan edzett üvegből készül, ami megakadályozza a repedések keletkezését.

A szigetelők felületén lerakódik a szennyeződés, amely száraz formában nem jelent problémát. Amint ez nedvessé válik, a felületén vezetőréteg kezd el kialakulni, emiatt pedig nagyobb (kb. 250mA) szivárgóáram kezd folyni, így lokálisan elpárolog a nedvesség egy és száraz szakasz alakul ki. Részleges felületi kisételek jön létre, mivel a szigetelőnek csak egy kis része szigetel teljesen, emiatt a részleges kisételek meghosszabbodik, míg végül teljes átíveléssé alakul. A folyamat kialakulásában jelentős szerepet játszik a kúszóút hossza és annak minden tulajdonsága, azonban a szigetelőket nem belső villamos tulajdonságokra, hanem  $U/L_s$  (fázisfesz/kúszóút) felületi feszültséggradiensre szokás méretezni.

A kompozitszigetelők megoldják az UV degradációt, felületi kisételek, felületi eróziós és nedvesség behatolási problémákat. Akár 90%-kal könnyebb, rövidebb, jól ellenáll a hirtelen mechanikai hatásoknak és a vibrációnak, illetve a vandalizmusnak is. Felépítését tekintve az ernyőzetének fontos tulajdonsága a hatékony nedvesség elleni lezárás, hiszen ez határozza meg a szennyeződésekkel szembeni ellenállóképességét. A hidrofobicitás értékelés: teljes felület és nedvesség által elfoglalt terület aránya alapján. Jobb hidrofobicitás esetén az érintési szög nagyobb. Üvegszál erősítésű magja adja a mechanikai terhelhetőséget, a végszerelvények pedig a mechanikai terhelést tartják. Ismert problémái a kompozitszigetelőknél az üvegszál erősítésű mag hosszanti törése rossz kezelés vagy gyártástechnológiai pontatlanságok miatt, illetve az előjel nélkül, a szigetelő normál mechanikai terhelés melletti törését eredményező ridegtörés, amely mögött komplex villamos-mechanikai-vegyi folyamatok állnak.

### **3. Ismertesse a kábelek esetén minden feszültség szinten megoldandó problémákat. Mutassa be a kábelszigetelésekkel szemben támasztott követelményeket! Milyen további problémákat kell megoldani kis-, közép- és nagyfeszültségű kábeleknél?**

Minden feszültség szinten jelen lévő probléma a mechanikai védelem, a termikus tervezés (szigetelőanyag megengedhető maximális/tartós hőmérséklete), villamos szilárdság és a megfelelő szigetelőanyag kiválasztása. A kábelszigetelésekkel szemben számos követelményt támasztunk, ezek közül a legfontosabbak a magas szigetelési ellenállás, nagy villamos szilárdság, kis permittivitás és veszteségi tényező, ne legyen higroszkópos, öregedéssel szembeni ellenállás, mechanikai erősség, nyúlási és hajlíthatósági tulajdonságok, ne legyen túl drága.

A nagyfeszültségű kábeleknél problémákat okoz még a nagy kapacitás és az ezáltal nagyobb kapacitív töltőáram, amely nagyon nagy természetes teljesítményt eredményez. Probléma továbbá a tértöltés, különösen egyenfeszültségen, amely speciális anyagszerkezetet igényel. Középfeszültségű kábelek esetén gondot okoznak a részletörések – simítóréteg a vezető és a szigetelés felületén –, illetve a water-treeing, azaz a hosszanti vízzárás. A KIF kábelek legfőbb problémája a mechanikai védelemre méretezett szigetelés.

### **4. Ismertesse egy egyfázisú középfeszültségű kábel felépítését! Mi a térkitöltési tényező?**

Egy egyfázisú KÖF kábel legfőbb része a fázisvezető a kábel magjában. Ezen vezető ér felületére simítóréteg található, hogy ne legyenek üregek a vezető és a szigetelőanyag között, és hogy megakadályozza a részkeséseket. Ezután következik az érszigetelés, majd félvezető simítóréteg. Erre kerül fel a koncentrikus vezető vagy árnyékolás, melyet a burkolat követ a nedvesség és mechanikai hatások elleni védelem miatt. A térkitöltési tényező a vezetők keresztmetszete osztva a kábel teljes keresztmetszetével.

## A villamos ív és az ívvédelem alapjai

### 5. Hogyan keletkezhet villamos ív? Írja le az ív fennmaradásában szerepet játszó folyamatokat!

Villamos ív alapvetően két esetben jöhet létre. Gázok átütése után, ha a tápáramkör megfelelően nagy teljesítményű, például a Townsend-elmélet szerint lökési ionizációkor vagy nagyfeszültségen bekapcsoláskor az elő-átütés miatt. Az elektronok villamos erőterben ha megfelelően nagy energiával ütköznek, akkor a gerjesztődni fognak, sorozatos ütközési ionozás után pedig elektronlavina alakul ki.

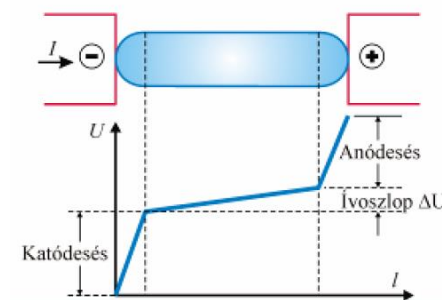
Kikapcsolási folyamatok során is kialakulhat ív minden feszültség szinten, amely befolyásolja a kikapcsolást magát. A kapcsoló érintkezői elkezdnek nyitni, ekkor a csökkenő érintkezőnyomás hatására a valós érintkező felületek csökkennek, az áram így hosszabb úton és kisebb keresztmetszeten folyik át. Az áramsűrűség lokális növekményei olyan melegedést hoznak létre, ami megkönnyíti az elektronok kilépését a fémből, illetve a környező gáz ionizálódását. Az éppen egymástól elváló érintkezők között emiatt töltéshordozók vannak jelen, amelyen az áram tovább folyik. Ha megszűnne az áram, akkor az áramkör inductivitása miatt hirtelen megnövekedő feszültség átüti az érintkezők közötti kicsiny távolságot.

Az ív fennmaradását két folyamat befolyásolja. Az ionmérleg az ionozott részecskék keletkezésének és semlegesítésének egyensúlya. Az ívben folyamatosan keletkeznek és szűnnek meg az ionozott részecskék. Állandó mennyiségű töltéshordozó mellett az ív stabilan ég, viszont csökkenő mennyiségű töltéshordozó hatására megszűnik az ív.

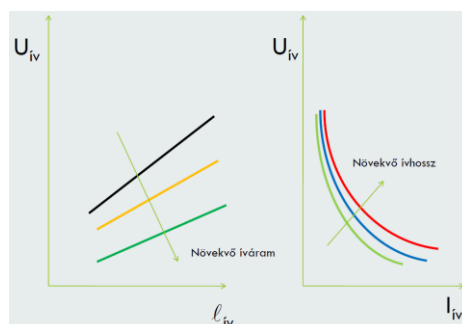
Az energiamérleg az ív melegedésének és hűlésének viszonya, hiszen benne Joule-hő keletkezik, melynek távozása közegfüggő. Ha az ívben a keletkező hő egyenlő vagy nagyobb a leadott hővel, akkor ég tovább, viszont, ha a keletkezőnél nagyobb a leadott hőteljesítmény, akkor kialszik az ív.

### 6. Melyek az ív alapvető részei? A villamos ív, mint áramköri elem: stacioner, dinamikus és kvázistacioner ívkarakterisztikák.

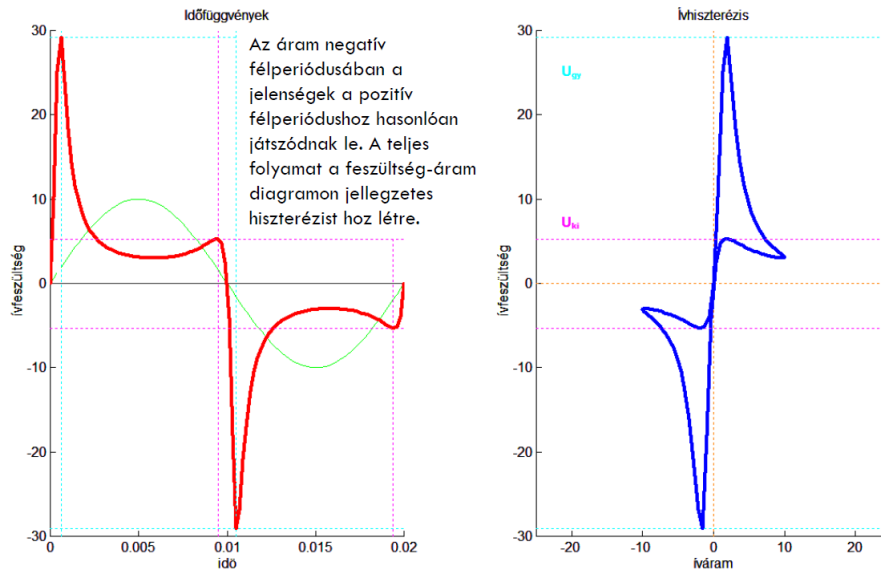
Az ív ionizált gáz kis méretű talppontokkal. Az anód- és katódcsés tartományának hossza mikrométeres nagyságrendbe esik. Kif-en az anód és katód környékén, NaF-on pedig az ívoszlopban lejátszódó fizikai folyamatoknak van döntő szerepe.



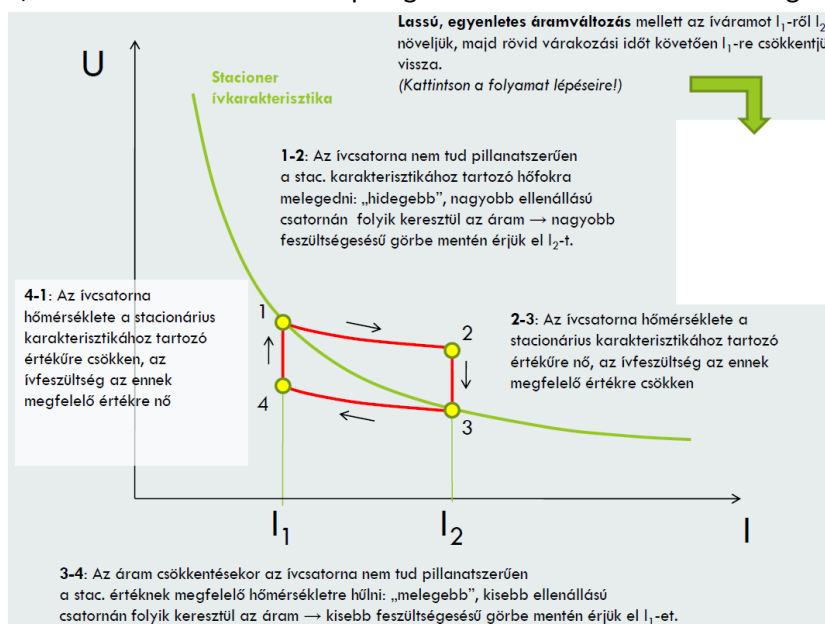
A villamos ív legtöbb esetben nemlineáris áramköri elemként viselkedik. A stacioner ív állandósult üzemben lévő egyenáramú ív. Kisebb áramoknál az ív inverz (eső) karakterisztikát mutat. Állandó hossz esetén feszültség-áram diagramon ábrázoljuk, állandó áram esetén pedig feszültség-hossz diagramon.



A kvázistacioner ív állandósult üzemben lévő váltakozó áramú ív. Váltakozó áramú körökben NaF esetben az ívfeszültség kicsi, az áram szinuszos. A karakterisztikákon fellelhetőek jellegzetes gyújtási és kialvási feszültségcsúcsok.

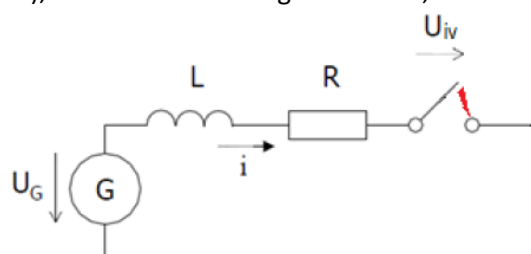


A dinamikus ív tranziens folyamatokban lévő ív. Az áram hirtelen megváltozására az ív hőmérséklete, így a vezetőképessége sem tud azonnal reagálni. Hirtelen áramnövekedésre a stacionernél nagyobb feszültség adódik, hirtelen áramcsökkenésre pedig a stacionernél kisebb feszültség adódik.



## 7. Ívöltési módszerek egyen- és váltakozóáramon. Hogyan gyulladhat újra az ív? Mi az áramlevágás jelensége?

Az egyenáramú ív kialvásának feltétele, hogy az ívfeszültség a hálózati feszültségnél nagyobb legyen. Áramkörből történő levezetés esetén megállapíthatjuk, hogy mivel szuperpozícióval számolható az áramkör (feszforrás és ívfesz), az áram akkor fog csökkenni, ha az ívfeszültség nagyobb, mint a tápfeszültség.



Következésképpen az ívoltageknak az ívfeszültség növelését kell céloznia. Ez történhet egyrészt az ívnyújtásával gyors érintkezőtávolság mellett, illetve ívhűtéssel pl. az érintkezőtömeg növelése által.

Váltakozóáramú esetben az ív minden nullátmenetben kialszik, majd újragyullad, ezért ekkor az ívoltageknak módja az újragyulladás megakadályozása, esetekben ráadásul nem csak pillanatnyi kialvás van, hanem konkrét rövidebb áramszünet figyelhető meg. Váltóáram esetében az ívoltageknak történhet az ívidőállandó növelésével, a rekombinálódás gyorsításával, maradék ívcsatorna nyugalmi állapotban lévő közeggel történő átöblítésével, illetve több megszakítási hely alkalmazásával.

Váltóáram esetében az ív termikus módon újragyulladhat. Ennek oka, hogy a nullátmenet pillanatában a maradék ívcsatorna még ionizált, forró közeg, az érintkezők között kialakuló visszaszökő feszültség hatására pedig utó- vagy maradékáram kezd folyni. Ez az utóív termikus egyensúlyát megbonthatja, a hőmérséklet emelkedésével pedig nő a vezetőképesség, így az áram is egyre nagyobb lesz. A dielektromos újragyulladás során, ha a termikus folyamatok szerepe elhanyagolható, akkor átütés jöhet létre lökésiionizáció következtében, amennyiben az érintkezők között kellően gyorsan növekszik a visszaszökő feszültség.

Az ívoltageknak egyik legnagyobb nehézsége, hogy a gyors kialvás céljából fogatosított intézkedések ne vezessenek áramlevágáshoz, azaz az áramnak a nullátmenet előtti hirtelen megszűnéséhez. Ez azért probléma, mert jelentős mennyiségű energia marad az áramkör induktivitásában, így jelentős túlfeszültségek léphetnek fel. Ez a jelenség leginkább a KÖF vákuummegszakítók esetében lép fel.

## 8. Mi az ívvédelem feladata és mik az eszközei? Mi az ATPV és az EBT definíciója? Melyek az egyéni védőeszköz (PPE) kiválasztásának lépései az IEEE 1584 szerint?

Az ívvédelem feladata a dolgozók védelme a villamos ív következő hatásaival szemben: égési sérülések, légzőszervi károsodások, halláskárosodás, szétrepülő hulladék okozta sérülések, a leginkább kitett testrészek az arc és a szem. Feszültség alatti vagy közeli munkavégzés esetén lépéseket kell tenni a hatás csökkentése érdekében. A védekezés alapja a véletlenszerűen kialakuló ív energiájának kiszámítása a hálózati paramétereiből és a védelmi beállításokból. A zárlatszámításból meghatározható, hogy mekkora íváram alakulhat ki, a védelmi beállításokból pedig, hogy mennyi ideig maradhat fenn az ív. A védekezés egyik módja a paraméterek megváltoztatása: áramkorlátozás fojtótekerccsel, betáplálási pontok darabolása, gyorsabb védelmi beállítás és megfelelő készülékialakítás. Az egyéni védőfelszerelések is fontosak, de ezek csak utolsó védvonalat jelentenek: íválló ruházat, íválló kesztyű, arcvédelem és szemüveg.

ATPV (Arc Thermal Performance Voltage): azon terhelőenergia értéke, melynek közlése esetén adott íválló anyagmintán annyi hőátadás történik, mely 50%-os eséllyel elegendő másodfokú sérülés kialakulására átlukadás nélkül. Egyszerűbben pedig: az az energia, melynek hatására a tesztminta mögött mért hőátadás 50%-os eséllyel eléri a Stoll-görbét.

EBT (Energy Breakopen Threshold): azon terhelőenergia mértéke, melynek hatására 50%-os eséllyel az anyagminta felületén meghatározott méretű sérülés keletkezik. A sérülés legalább 1,6cm<sup>2</sup> méretű lyuk.

A PPE egyéni védőeszközök kiválasztásának lépései az IEEE 1584 szabvány szerint:

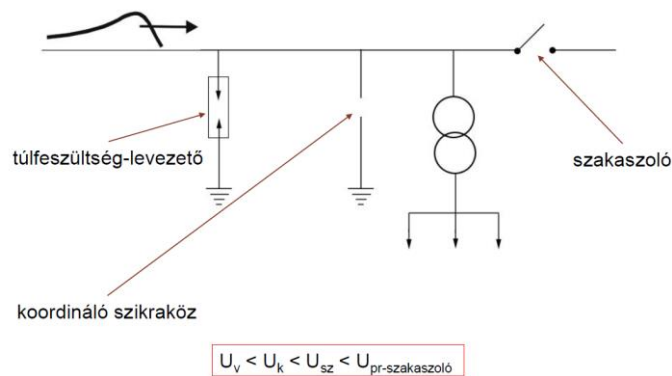
1. lépés – Villamos rendszer adatainak felvétele
2. lépés – Villamos rendszer üzemállapotainak meghatározása: íveszély szempontjából vett legrosszabb eset meghatározása
3. lépés – Rövidzárási áram meghatározása a feltételezett ív kialakulásának helyén –Méréssel vagy számítással
4. lépés – Íváram meghatározása számításokkal
5. lépés – Ív fennállásának időtartama
6. lépés – A berendezés feszültségének és osztályának dokumentálása
7. lépés – Munka közben fennálló távolság meghatározása
8. lépés – Terhelő energia számítása
9. lépés – Határvonal kijelölése („Flash Protection Boundary”)

## Szigetelések feladatai és igénybevételei

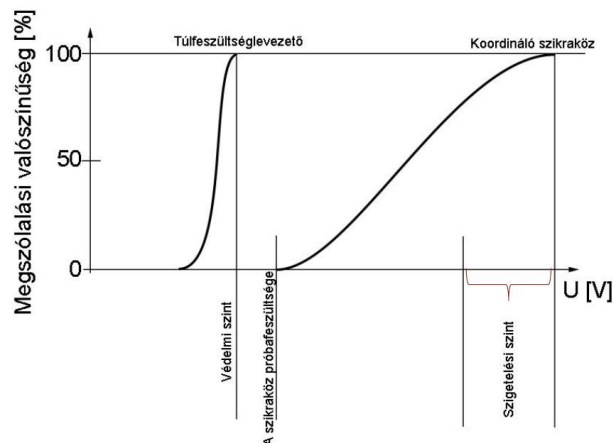
### 9. Csoportosítsa a szigetelések lehetséges villamos igénybevételeit, és ismertesse a szigetelési szintek koordinálását!

A szigeteléseket érő villamos igénybevételek lehetnek egyrészt kisülések: átütés, átívelés vagy részkisülés (felületi vagy belső kisülés). Lehetnek továbbá feszültségek: névleges, üzemi, tartós túlfeszültség, kapcsolási vagy belső túlfeszültség, illetve léghőri túlfeszültség. Igénybevétel lehet még a próbafeszültség is: ipari frekvenciájú, lökőhullám vagy kapcsolási hullámú próbafeszültség.

A szigetelések belső túlfeszültségét (<220kV) a berendezésnek el kell tudnia viselni. Ezzel szemben a léghőri túlfeszültségek miatt veszélyeztetett berendezések (szabadvezetékek berendezései) esetén védőeszközök használata indokolt. Nem veszélyeztetett berendezések például a kábelhálózatok berendezései. A villamos berendezések túlfeszültség védelmét az alábbi módon oldjuk meg:



A koordinált feszültségszintek viszonyát az alábbi ábra szemlélteti:



A b biztonsági tényező a szigetelési szint és a védelmi szint hányadosa:

$$b = \frac{\text{szigetelési szint}}{\text{védelmi szint}}$$

- látható biztonsági tényező A: 3...35 kV b = 1,4 (1,2)
- látszólagos biztonsági tényező B: 120...220 kV b = 1,4...1,2
- valódi biztonsági tényező C: ≥ 400 kV b = 1,1...1,2

Feszültség	Csillagpont, alkalmazott próbafeszültség
A: 3...35 kV	közvetve földelt csillagpontú, tartós ipari frekvenciás túlfeszültségek $U_{pr\sim}$
B: 120...220 kV	mereven földelt csillagpontú hálózatok $U_{pr\text{ lökő}}$
C: ≥ 300 kV	$U_{pr\text{ kapcsolási}}$

## Kisülési jelenségek gázszigetelőkben (szigetelés nagy térerősség esetén)

### 10. Írja le a gázok átütésben szerepet játszó folyamatokat és az átütést!

A nagy térerősség hatására felgyorsuló elektronok ugyanis ütközési ionozás útján újabb és újabb töltéshordozókat hoznak létre, így alakul ki az ún. elektronlavina. Az elektronlavina megindulásának alapfeltétele egy ún. startelektron keletkezése, amit fotoionozás, kozmikus háttérsugárzás stb. hozhat létre. Az ütközési ionozás hatásosságát döntően befolyásolja az elektronok átlagos szabad úthossza, vagyis az a távolság, amelyen a villamos térerősség az elektront gyorsítja, neki mozgási energiát ad. Az ütközés pillanatában akkor keletkezhet új töltéshordozó, ha az elektron mozgási energiája már meghaladja az adott molekula ionizációs energiáját. Az elektronlavinából alakul ki a halvány fényszálakat formáló pamatos kisülés, majd, ha a pamatok árama meghalad egy kritikus értéket (hőionozási határáram), a kisülés jellege megváltozik, a töltéshordozók létrehozásában már a hőionozás is részt vesz és kialakul az átütési csatorna. A teljes átütési folyamatot tehát az határozza meg, hogy van-e startelektron, majd ezt követően a különböző ionozási folyamatok képesek-e hirtelen nagy mennyiségű töltéshordozó létrehozására.

Átütésnek hívjuk, ha a villamos szilárdság, vagyis a szigetelőképeség letörése az elektródák között egynemű szigetelőanyagon keresztül következik be, akkor átütésről beszélünk. Ugyancsak átütésről beszélünk, ha a szigetelőképeség több szigetelőanyagon keresztül törik le.

### 11. Mitől függ a gázok villamos szilárdsága és hogyan?

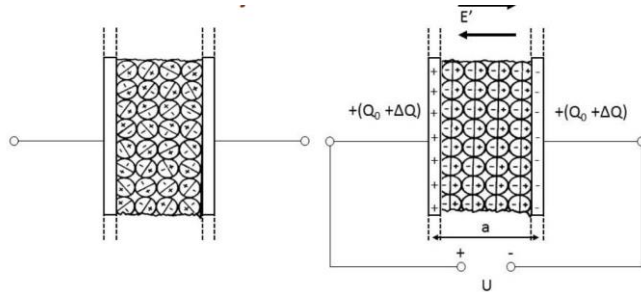
A villamos szilárdság értékét több tényező befolyásolja. Ezek az alábbiak: - az alkalmazott feszültség fajtája (egyen-, váltakozó- vagy lökőfeszültség /feszültség impulzus/) - a levegő nyomása, hőmérséklete, páratartalma. - az elektródok távolsága - az elektródok alakja - az elektródok polaritása - az igénybevétel időtartama (ill. a feszültségváltozás sebessége) A feszültség fajtája és a feszültségváltozás sebessége azért befolyásolja a villamos szilárdság értékét, mert az átütési csatorna kialakulásához szükség van bizonyos időre (ún. átütés késés). Ennek a késleltetésnek két összetevője van: a startelektron létrejöttéhez szükséges idő (várakozási idő) és az ebből kiinduló, az átütési csatornát létrehozó folyamatok kifejlődéséhez szükséges idő (kialakulási idő). Ha tehát egy gyors felfutási meredekségű impulzust alkalmazunk, ahol rövid idő alatt nagymértékben változik a feszültség, nagyobb villamos szilárdság értéket fogunk kapni, mert az átütés késés alatt tovább tud növekedni a feszültség, mint lassú feszültségnövelés esetén. A nyomás és elektródtávolság hatását az ún. Paschen-törvény írja le, amelynek érdekessége, hogy adott elektródelrendezés esetén van egy olyan nyomásérték, ahol az átütési feszültség minimális (levegőre 327 V), ettől kisebb és nagyobb értékek esetén az átütési feszültség nő.

### 10. és 11. kérdésre saját válaszok:

## Vezetés és polarizáció (szigetelés kis térerősség esetén)

12. Írja le a dielektromos polarizáció jelenségét (töltések, polarizációs vektor polarizáció fajták)!

Polarizáció esetén a  $Q$  töltésszámra felírható, hogy  $Q = Q_0 + \Delta Q = Q_0 + Q_k$  ahol  $Q_{sz}$  a szabad,  $Q_k$  pedig a kötött töltések száma.



$$D = \epsilon_0 E + P$$

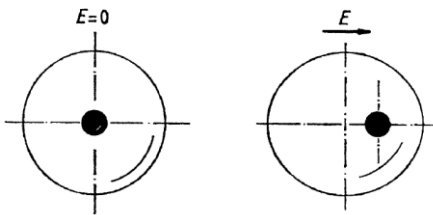
mivel  $D = \epsilon \epsilon_0 E$

$$P = (\epsilon - 1) \epsilon_0 E$$

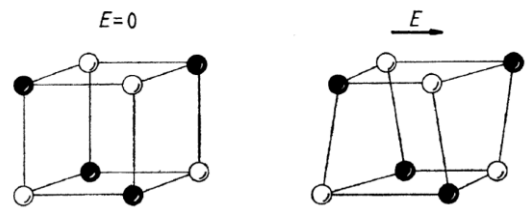
$$P = M / V$$

a térfogategységre jutó dipólusmomentum

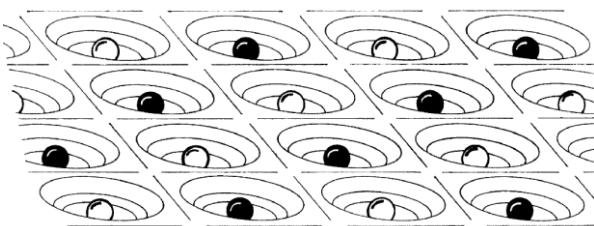
Elektron eltolódási polarizáció  $\tau = 10^{-14} - 10^{-16}$  s



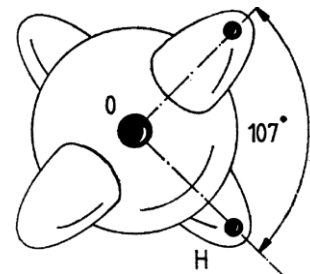
Ion-eltolódási polarizáció  $\tau = 10^{-12} - 10^{-13}$  s



Hőmérsékleti ionpolarizáció  $\tau = 10^{-2} - 10^{-4}$  s



Állandó dipólusok



Állandó dipólusok

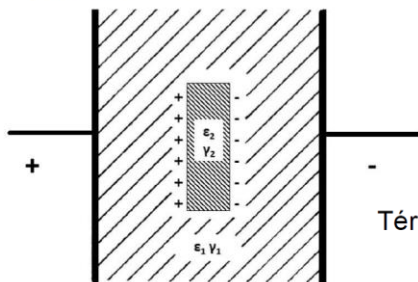
- Hőmérsékleti orientációs polarizáció

$$\tau = 10^{-6} - 10^{-10} \text{ s}$$

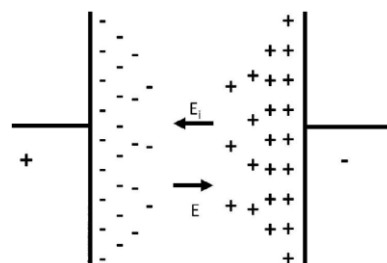
- Rugalmas orientációs polarizáció

$$\tau = 10^{-10} - 10^{-13} \text{ s}$$

Határréteg polarizáció



Tértöltéses polarizáció





## 10. és 11. kérdésre saját válaszok:

### Milyen tényezők befolyásolják a villamos szilárdságot?

- **az alkalmazott feszültség fajtája** (egyen-, váltakozó- vagy lököfeszültség /feszimpulzus), a **feszültségváltozás sebessége**: az átütési csatorna létrejöttéhez bizonyos időre - **átütés késés** - van szükség. Ennek a késleltetésnek két összetevője a **várakozási idő** a **startelektron** létrejöttére és a **kialakulási idő** az átütési csatornát létrehozó folyamatokat illetően. Tehát gyors meredekecsű impulzusnál - rövid idő alatt nagy feszültségváltozás - nagyobb villamos szilárdsághoz jutunk, mert az átütés késés alatt tovább tud növekedni a feszültség, mint lassú feszültségnövelés során.
- **a levegő nyomása, hőmérséklete, páratartalma**: a nyomás és a hőmérséklet egymással összefügg, hatásukat az elektronok szabad úthosszának változásán keresztül fejtik ki. Állandó nyomás mellett a hőmérséklet növekedésével nő az átlagos szabad úthossz, emiatt hatásosabb lesz az ionozás, így pedig csökken az átütési feszültség. A páratartalom növekedése ezzel ellentétben az ionozás hatásosságát rontva növeli a villamos szilárdságot.
- **az elektródok távolsága** (lásd:  $U_0 = E_{sz} \cdot d$ )
- **az elektródok alakja** (lásd: Rogoswsky-elektrod)
- **az elektródok polaritása**
- **az igénybevétel időtartama**

### Hogyan jön létre a villamos átütés a levegőben?

A levegőben lévő elektródok között addig növeljük a feszültséget, amíg nem következik be az átütés. A nagy térerősségben gyorsulnak az elektronok, **ütközési ionozás** során pedig új töltéshordozókat hoznak létre - így alakul ki az **elektronlavina**. Az elektronlavina megindulásának feltétele egy **startelektron**, amely fotoionozás vagy pl. kozmikus háttérsugárzás által jöhet létre. Az ütközési ionozás sikeressége nagyban függ az **elektronok átlagos szabad úthosszától**: ez az a távolság, amely a villamos térerősségben gyorsítja az elektront, és mozgási energiát ad neki. Ütközéskor akkor keletkezhet új töltéshordozó, ha az elektron mozgási energiája már meghaladja a leütökött molekula ionizációs energiáját. Az elektronlavinából halvány fényzárlatformájú **pamatos kisülések** jönnek létre. Ha ezen pamatok árama meghalad egy kritikus értéket - a **hőionozási határáramot** -, akkor megváltozik a kisülés jellege. A töltéshordozók létrehozásában már a hőionozás is részt vesz, illetve kialakul az **átütési csatorna**. A teljes átütési folyamatot meghatározza a startelektron megléte, majd az ionozási folyamatok hirtelen nagy mennyiségű töltéshordozókat létrehozó képessége. Elegendően nagy tápteljesítmény esetén létrejön a **villamos ív**, melyet jó vezetőképesség, nagy áram jellemez, és a töltéshordozók hő-, illetve fotoionozás révén jönnek létre az ívcsatornában. Ekkor az ív hatására hirtelen lecsökken az elektródokra kapcsolt nagyfeszültségű próbatranszformátor feszültsége.