



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

PVC szigetelések dielektromos jellemzőinek vizsgálata

TDK dolgozat

Nagy Anna

Konzulens:
Dr. Tamus Zoltán Ádám
Egyetemi docens

Budapest, 2015

Absztrakt

A villamosenergia rendszerekben számos alkalmazásban található PVC szigetelésű kábeleket, főleg erőművekben, ez indokolja dielektromos tulajdonságaik vizsgálatát. A dolgozat témája a kábelszigeteléseknél alkalmazott lágyított poli(vinilklorid) dielektromos folyamatainak vizsgálata, és a lágyító tartalom hatása a dielektromos jellemzőkre.

A polimer szigetelésekre jellemző, hogy a szigetelési ellenállás mérés során a szigetelésen átfolyó áram csak igen hosszú idő után állandósul a szigetelésben megjelenő lassú polarizációs folyamatok miatt. A vizsgálathoz ismert összetételű, különböző lágyító tartalmú PVC szigetelőanyag-mintákat használtunk. A dielektromos folyamatokat szigetelési ellenállás mérés és visszatérő feszültség mérés módszerével vizsgáltuk. Így adott szigetelőanyag vezetőképességét és polarizációs vezetőképességét két független méréssel vizsgálhatjuk. A kétféle mérés eredményeiből a lassú elemi polarizációs folyamatok háttere könnyebben vizsgálható.

Abstract

One may find PVC insulated cables in numerous electric power engineering applications, mostly in power plants, which gives ground for the investigation of their dielectric properties. In this study, the dielectric processes of plasticized PVC insulation was investigated, and the influence of the plasticizer content with respect to the dielectric properties.

It is well known that during the measurement of insulation resistance, the development of steady state current requires quite long time due to the slow polarization processes of polymeric insulations. The investigation has been executed on thin film PVC samples with different plasticizer content and the dielectric processes have been measured by insulation resistance and voltage response measurement methods. By the usage of these parallel measurements theory of slow polarization processes can be studied more precisely.

Tartalom

Absztrakt	2
Abstract.....	3
1. Bevezetés	5
2. PVC, mint kábelszigetelés.....	6
2.1. A poli(vinil-klorid) anyagszerkezete és tulajdonságai.....	6
2.2. A PVC adalékai és lágyító tartalmának hatása	6
2.3. A PVC alkalmazása és feldolgozása	8
2.4. A PVC öregedési mechanizmusai	9
3. Szigetelés vizsgálat és diagnosztika	11
3.1. Szigetelés vizsgálati módszerek	11
3.2. Dielektromos jellemzők vizsgálata	12
3.3. Polarizáció és fajtái	13
4. Szigetelőanyagok helyettesítő kapcsolása és alkalmazása	15
4.1. Szivárgási áram mérésének módszere és alkalmazása	15
4.2. Teljes feszültség válasz módszere és alkalmazása	17
5. A vizsgált PVC minták tulajdonságai	19
5.1. A vizsgált PVC minták mechanikai tulajdonságai	19
6. Mérések és eredmények.....	21
6.1. Különböző lágyító tartalmú minták vizsgálata szivárgási áram méréssel	21
6.2. A PVC minták vizsgálata a teljes feszültségválasz módszerével	24
6.3. A két módszer által adott eredmények összevetése	28
7. Összefoglalás	31
8. Irodalomjegyzék.....	32
9. Mellékletek.....	34
9.1. Szivárgási áram mérés mért adatai	34
9.2. Teljes feszültségválasz módszer mért és számított adatai.....	35

1. Bevezetés

A PVC szigetelések dielektromos vizsgálatára és öregedési mechanizmusainak feltérképezésre szükséges van, hisz hatalmas mennyiségben vannak beépítve jelenleg is üzemelő rendszerekbe. Annak ellenére, hogy a jelenlegi kábelgyártásban már egyre inkább visszaszorul a PVC használata és inkább kifestültségű kábeleknél alkalmazzák, pár évvel ezelőtt még a kábelszigeteléseknél ezt a polimer alapanyagot részesítették előnyben. Ezért a villamosenergia rendszerekben számtalan helyen megtalálható ez a szigetelőanyag. A PVC szigetelések jelenleg is olyan helyeken és alkalmazásokban vannak beépítve, ahol akár 20-30 évig biztosítaniuk kell a különböző potenciálú vezető anyagok egymástól történő elszigetelését. Ezek üzembiztos működésük főleg erőművi kábelek esetén nélkülözhetetlen.

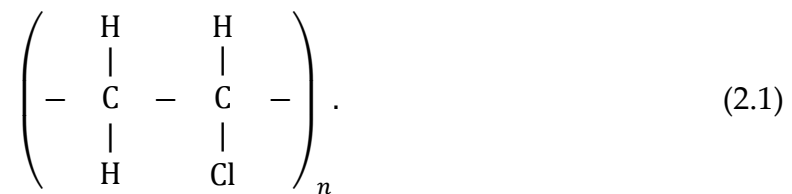
A dolgozat témája a kábelszigeteléseknél alkalmazott lágyított poli(vinil-klorid) dielektromos folyamatainak vizsgálata. A PVC egy szerves szigetelőanyag, azon belül is egy amorf hőre lágyuló polimer. A szilárd villamos szigetelések alapanyagaként használnak szerves és szervetlen szigetelőanyagokat egyaránt. A szervetlen kerámia szigetelések villamos szilárdsága kiváló és nem lép fel öregedés használatuk során, viszont merevségük és ridegségük miatt alkalmazhatóságuk korlátozott. A szigeteléstechikában, ha kisebb merevségű és nagyobb rugalmasságú anyagra van szükség, általában polimereket használnak. A polimerek monomerekből felépülő óriás molekulák. A polimerek között vannak természetes és mesterséges polimerek. A mesterséges polimereket két csoportra oszthatjuk, a hőre lágyuló és a hőre nem lágyuló polimerekre. A hőre lágyuló polimerek között is megkülönböztethetünk amorf és részben kristályos anyagokat, míg hőre nem lágyuló (hőre keményedő) polimerek között pedig duromereket és elasztomereket. A polimer szigetelések kialakításukat és mechanikai tulajdonságaikat tekintve is sokfélék, hátrányuk a kerámiákkal szemben viszont, hogy hajlamosak az öregedésre.

2. PVC, mint kábelszigetelés

A poli(vinil-klorid) azaz PVC korábban az egyik leggyakrabban alkalmazott hőre lágyuló szintetikus polimer volt a szigetelés technikában, főleg kábel szigetelések esetén. Ennek háttérében a kábelek gyártástechnológiája áll, hisz ezeket extrúzióval készítik. Az extrúziós polimer feldolgozási technológia leggyakrabban használt alapanyaga pedig a PVC, tehát az extrudált termékek nagy része is ebből készül a több méter átmérőjű szennyvízvezetékektől kezdve az iratsínig.

2.1. A poli(vinil-klorid) anyagszerkezete és tulajdonságai

A poli(vinil-klorid) egy amorf hőre lágyuló polimer alapanyag, a világon legnagyobb mennyiségben előállított tömeg polimerek egyike. Általában szabadgyökös polimerizációval állítják elő. A PVC monomerjének klór tartalmát NaCl-ból nyerik, így nagy mennyiségben, olcsón előállítható. A PVC ismétlődő egységét a következő egyenlet mutatja:



A polimer láncokat polimerizációval alakítják ki a (2.1) egyenletben látható monomerből, így egy jó ütésállóságú, kis sűrűségű és jó hidegtűrésű alapanyagot előállítva. [1], [2]

A PVC nem hajlamos a vízfelvételre, emiatt nedves környezetben is megőrzi kiváló szigetelőképességét, ezért alkalmazzák többek között földkábelek szigetelésénél. Szigetelőanyagként történő alkalmazhatóságát az is segíti, hogy természetesen égésgátolt polimer, így jó a hőállósága és nehezen ég. Tartós magas hőmérsékleten viszont égése során klórgáz képződik, ami a nyálkahártya nedvesség tartalmával reakcióba lépve sósavat képez, így egyre inkább kerülnek a lakóépületekben történő alkalmazását. Alkalmazhatóságát továbbá korlátozza még a vegyszerekkel szembeni gyenge ellenálló képessége, így például az élelmiszeriparban nem használják. Az erős UV sugárzásra is érzékeny, de ezt a tulajdonságát UV stabilizátorokkal lehet javítani. [1], [3]

2.2. A PVC adalékai és lágyító tartalmának hatása

A szintetikus polimerek tulajdonságait különböző adalékokkal befolyásolhatjuk, ilyenek többek között a színezékek, stabilizátorok vagy a feldolgozást segítő csúsztatók. A polimer termék hő- és villamos vezetőképességét, sugárzással és vegyszerekkel

szembeni ellenállóképességét, mechanikai jellemzőit, de még az árát is befolyásolják a felhasznált adalékok és töltő anyagok.

A poli(vinil-klorid) esetében kiemelendő, hogy a mechanikai tulajdonságait viszonylag széles tartományon belül változtathatjuk az alapanyag lágyító tartalmának helyes megválasztásával. A lágyító tartalomtól függően beszélhetünk lágy és kemény PVC-ről, tehát a kemény- és lágy PVC egyaránt tartalmaz lágyítót, csak más-más mennyiségben. Az anyag tulajdonságainak változékonyságát a 2.1. táblázat adatai is jól mutatják. A 2.1. táblázat a műanyagiparban alkalmazott PVC-k általános fizikainak jellemzőinek tartományait mutatja, mely értékeket különböző összetételű PVC mintákon végzett mérések alapján állapították meg. A lágyítóadalék használatával csökken a polimer termék merevsége és szilárdsága, ezzel együtt nő a jellemző szakadási nyúlás és az ütőmunka. Mindemellett befolyásolja a PVC üvegesedési hőmérséklet tartományát (T_g), a lágyítótartalom növelésével ez a hőmérséklet csökken. [4]

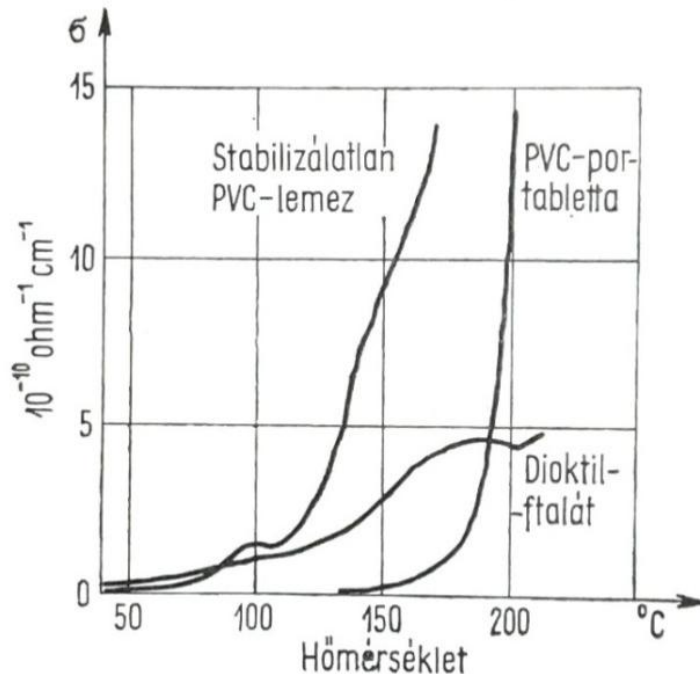
2.1. táblázat: A PVC alapanyagok főbb tulajdonságainak jellemző tartományai [5]

A PVC főbb tulajdonságai			
Sűrűség – ρ	1300 - 1580		kg/m ³
Ár – c	272 - 299		HUF/kg
Üvegesedési hőmérséklet tartomány – T_g	74,9 - 105		°C
Rugalmassági modulusz – E	2,14 - 4,14		GPa
Szakító szilárdság – σ	40,7 - 65,1		MPa
Szakadási nyúlás – ϵ	11,9 - 80		%
Szigetelési ellenállás – R	10^{14} - 10^{16}		Ω cm

A lágyítóként használt anyagok általában olyan oligomerek és polimerek, melyek az adott polimerrel összeférhetőek, azaz keveréküket lehűtve sem válnak szét a fázisok. Ezen adalékanyagok molekulatömege jóval kisebb, mint az alapanyagé, így előfordulhat anyagon belüli migráció. Működési mechanizmusuk, hogy az alapanyag molekulaláncainak távolságát növelik úgy, hogy azokkal másodlagos kötéseket alakítanak ki. Ez csak a polimerek amorf szerkezetű részeiben lehetséges. [4]

A lágyított PVC üvegesedési hőmérséklete jóval kisebb, mint a lágyítót nem tartalmazóé, így az alkalmazási hőmérsékleten nagy rugalmas állapotban van. A lágyító tartalom nem csak a mechanikai tulajdonságokat befolyásolja, hanem az anyag villamos paramétereit és egyéb fizikai jellemzőit is. A lágyított PVC villamos tulajdonságai erősen hőmérsékletfüggőek, amit 2.1. ábra is jól mutat. Az ábrán tiszta poli(vinil-klorid), tiszta lágyító és lágyított PVC egyenáramú vezetőképessége látható a hőmérséklet

függvényében. Ez alapján megállapítható, hogy a poli(vinil-klorid) fajlagos vezetőképessége függ annak lágyító tartalmától, valamint az alap polimer és a hozzáadott lágyító közötti kölcsönhatástól. [2]

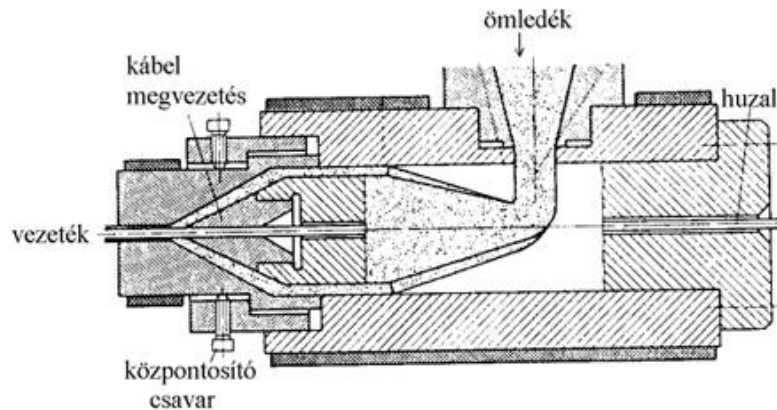


2.1. ábra: Tiszta PVC, dioktil-ftalát lágyító és lágyított PVC egyenáramú vezetőképességének hőmérséklet függése. [2]

2.3. A PVC alkalmazása és feldolgozása

A PVC-t számtalan helyen használják előnyös tulajdonságai miatt. Mind a kemény mind pedig a lágy PVC-t nagy mennyiségben dolgoz fel a műanyagipar. A kemény PVC egyik legjellemzőbb elektrotechnikai alkalmazásai a háztartásban is megtalálható kötődobozok, dugaszoló fedelek és egyéb villamos dobozok, kötőelemek. Ezeket jellemzően fröccsöntéssel állítják elő. Világszerte sokszor találkozhatunk kemény PVC-ből készült villamos védőcsövekkel is, melyeket extrúzióval állítanak elő. A védőcső feladata a benne lévő vezetékek mechanikai védelme. A PVC-ből készült villamos védőcsöveket égésgátolt polipropilénnel és polietilénnel kívánják kiváltani, a PVC egészségkárosító égés terméke miatt.

A lágy PVC nagy szerepet játszik a szigeteléstechikában kábel és vezeték burkolóanyagként. A kábelszigetelések a villamos védőcsövekhez hasonlóan extrúzióval készülnek. Viszont gyártásukhoz speciális szerszám szükséges, ezt a 2.2. ábra mutatja. „Az extrúzió terméke lehet lemez, fólia, cső, szál, vagy többszörösen összetett üreges termék, amilyen pl. egy többszekrényes, hőszigetelő PVC ablakprofil” [6]



2.2. ábra: Kábelbevonó „keresztfej” szerszám [6]

A polimereket legnagyobb tömegben extrúzióval dolgozzák fel. Ez egy nagyon termelékeny folyamatos technológia, mely során a tipikusan hőre lágyuló polimereket dolgoznak fel. Extrudálás folyamata [7]:

1. A polimert képlékeny állapotba hozzuk.
2. Ezt a viszkózus ömledéket homogenizáljuk.
3. Majd az ömledéket komprimáljuk, azaz nyomás alá helyezzük.
4. Az alapanyagunkat nyitott szerszámon keresztül sajtoltjuk.
5. Majd végül a kalibrálás egységben hűtjük ezzel biztosítva a méretállandóságot.

A folyamat első három lépését az extrúder csiga végzi. Az extrúder csigának három szakasza van: a behúzó, a kompresszió és a homogenizáló szakasz. A behúzó szakaszban a kezdetben szilárd polimer megömlik a nagy nyírás és hőmérséklet hatására. A kompresszió szakaszban folytatódik az alapanyag ömledék állapotba hozása, és a létrehozott viszkózus ömledék nyomásának növelése is ebben a szakaszban történik. Végül a homogenizáló és kitoló zónában, egy minden pontjában azonos tulajdonságú folyadék jön létre, és elég nagy nyomás alakul ki ahhoz, hogy az ömledék a szerszámba hatoljon. Különleges esetekben még egy gáztalanító szakasz is kerülhet a feldolgozó egységre. Az alakadás az extrúder szerszámban történik. Az extrúder szerszámnak három szakasza van: az átmeneti, az alakító és a simító szakasz. Ezen szakaszok végén még a termék meleg és alakítható, így nem biztosított a mérettartósága, ezért hűteni kell. [6], [7].

2.4. A PVC öregedési mechanizmusai

A polimerek esetében az öregedés során a molekulatömeg csökken, így az anyag fizikai tulajdonságai is megváltoznak. Az öregedést az anyagot érő igénybevételek váltják ki, amik lehetnek fizikai, kémiai vagy biológiai eredetűek. A károsodást okozó igénybevételeket egymástól nagyon különböző hatások is kiválthatják. A biológiai igénybevételről általában akkor beszélhetünk, ha az adott szigetelést baktériumok

bontják, a kémiai igénybevétel pedig a kémiai reakció okozta károsító hatás. Fizikai igénybevétel is sok féle lehet például: termikus, sugárzás okozta, mechanikai és villamos igénybevétel. A mechanikus és a korrodáló kémiai igénybevételek együttes hatása is felléphet ekkor feszültség korrózióról beszélhetünk. [4], [8]

Az egyik leggyakoribb a kábelszigeteléseket is érő fizikai igénybevétel a magas hőmérséklet okozta termikus igénybevétel. A polimerek molekulaláncai termikus igénybevétel hatására három féleképp kezdenek bomlani: degradációval, depolimerizációval és eliminációval. A polimer láncok statikus tördelődését degradációnak nevezzük. A depolimerizáció során monomerek törnek le az óriás molekuláról, míg elimináció az oldalcsoportok leszakadásával jár együtt úgy, hogy a főlánc nem sérül közben. [4]

A PVC szigetelések öregedése során négy olyan mechanizmust különböztethetünk meg, melyek az anyag szigetelési ellenállását megváltoztathatják. Az első ilyen romlási mechanizmus a sósav lehasadás, azaz a PVC esetén fellépő elimináció. Ez a folyamat lassítható stabilizátor hozzáadásával, mely megköti a leszakadó hidrogén-kloridot. Ahogy a stabilizátor mennyisége csökken és egyre több az oldalcsoport leszakadás, úgy megfigyelhető a PVC szigetelés vezetőképességének növekedése. A második szigetelési ellenállást befolyásoló jelenség a már említett lágyító migráció. A kis molekulatömegű lágyító a kábelszigetelésből kidiffundál, így fokozatosan csökken a mennyisége az alapanyagban, ezáltal a szigetelési ellenállás növekszik. A harmadik romlási jelenség az oxidáció, mely hatására a polimerek degradálódnak. Az oxidáció hatására a mechanikai tulajdonságai romlanak az anyagnak, és ridegebbé válik. A PVC oxidációját gátolni kell, de a levegő oxigénjétől nem zárhatóak el a szigetelőanyagaink. Végül a negyedik hatás a kapilláris vízfelvétel. A poli(vinil-klorid) hidrofób polimer, így nem hajlamos a hidrofil polimerekhez hasonló vízfelvételre, de az anyag mikrorepeséseiben valamennyi vizet elnyel. Ez a folyamat rontja a dielektromos és mechanikai tulajdonságokat. [9]

3. Szigetelés vizsgálat és diagnosztika

A villamos berendezések élettartama megegyezik a bennük található szigetelőanyagokéval, hisz a szilárd szigetelések nélkül működésképtelenek ezek a készülékek. A szigetelések tönkremenetének okai az őket érő igénybevételek. A szerves szigetelőanyagok a károsító idénybevételek hatására degradálódhatnak. A szigetelésvizsgálatok és általában a szigetelés diagnosztika azt a célt szolgálja, hogy villamos berendezéseinkben található szigetelő anyagok állapotát megismerjük, ennek ismeretében pedig meg tudjuk ítélni, hogy az adott eszköz képes-e az üzembiztos működésre.

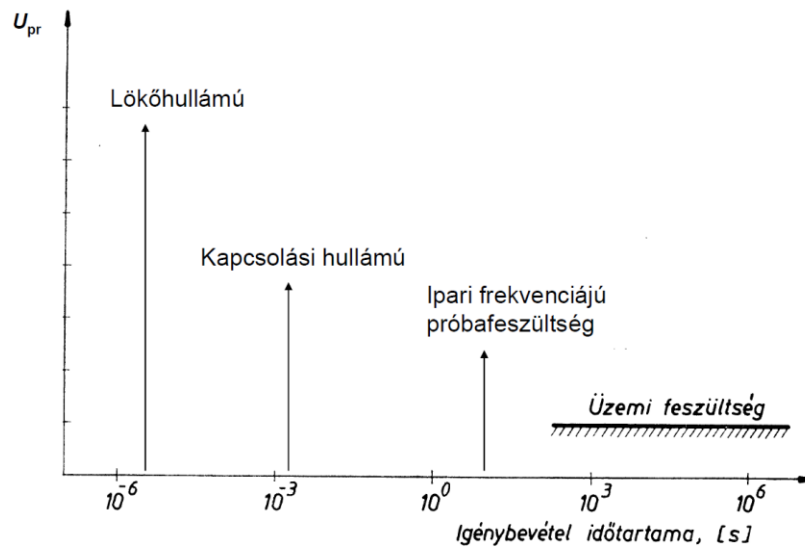
3.1. Szigetelés vizsgálati módszerek

A szigetelés vizsgálati módszerek esetében, mint az általános anyagvizsgálati módszerek esetén is, megkülönböztethetünk roncsolásos és roncsolásmentes módszereket. A roncsolásos anyagvizsgálatok esetében a vizsgált mintadarab károsodik és alkalmatlanná válik további felhasználásra. Ilyenek például a szabványos mechanikai anyagvizsgálatok, a szakító vizsgálat vagy a három pontos hajlító vizsgálat. A szigetelő anyagok esetében a legjellemzőbb roncsolásos eljárások az átütési vizsgálatok. Az átütési vizsgálat esetén az anyag villamos szilárdságának meghatározása a cél, ez az átütőfeszültség mérésével történik. [8]

A roncsolásmentes vizsgálati módszerek nem vagy elhanyagolható mértékben károsítják a vizsgálat tárgyát. Ez utóbbi csoportba tartoznak a részkisüléssel vizsgálatok és a feszültségpróbák. A részkisülés, átívelés és átütés a szigetelőanyag szigetelőképességének helyi megszűnése. Viszont a részkisülés vagy más néven részleges kisülés az átíveléssel és átütéssel ellentétben nem két elektróda között megy végbe, mert a kisülés nem éri át az elektróda pár teljes távolságát, esetleg eleve csak egy elektróda vesz részt a folyamatban, mint például a villámcsapás esetén, ami szintén egy részkisülés. Részkisülés a koronakisülés is, amivel gyakran találkozhatunk gázokban és folyadékokban nagy térerősségű inhomogén villamos erőterek esetén. A szigetelőanyagok felületén kialakuló részkisülést kúszókisülésnek, míg a szigetelőanyagok belsejében, a gázbuborékokban létrejövő részleges kisülést pedig üregkisülésnek nevezik. A részkisülések üzemi körülmények között történő megjelenése az adott villamos szigetelés élettartamának végét jelzi. Ezt a fizikai jelenséget a transzformátorok Buchholz relével megvalósított gázvédelme is használja. [10]

A feszültségpróbák esetén azt vizsgáljuk, hogy a szigetelőanyag egy adott jellegű villamos igénybevételt elvisel, tehát a vizsgált szigetelés villamos szilárdsága elér egy bizonyos értéket. A feszültségpróbák alkalmazása során különböző szabványos próbafeszültségeket használnak attól függően, hogy a vizsgált szigetelés milyen hatásoknak lesz kitéve. A lököhullámú próbafeszültség hullám alakja szabványos, egy $1,2 \mu\text{s}$ homlokidejű és $50 \mu\text{s}$ félértékidejű túlfeszültség-hullám, míg az ipari

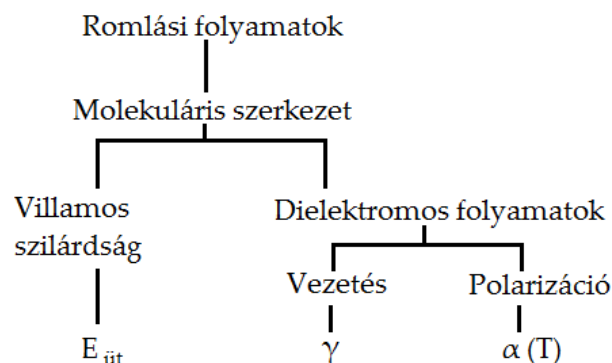
frekvenciájú 50 Hz-es szinusz. Ezek nemcsak jelalakban, de időtartamban és maximális feszültség szintben is eltérnek, ez utóbbi eltérést a 3.1. ábra jól mutatja. [8], [11]



3.1. ábra: Szigetelések próbafeszültségei [11]

3.2. Dielektromos jellemzők vizsgálata

A polimer szigetelés esetében a szigetelést érő igénybevételek hatására megváltoznak a fizikai tulajdonságai, ezáltal az anyag villamos jellemzői is megváltoznak. Ez adja a szigetelés diagnosztika alapjait. A 3.2. ábra mutatja, hogyan függenek össze az szigetelőanyagban fellépő romlási folyamatok és a villamos tulajdonságok. Ahogy az ábrán is látható, a károsodási folyamatok okozta anyagszerkezeti vagy anyag összetételi változások, nem csak a 3.1. fejezetben tárgyalt villamos szilárdságot befolyásolja, hanem valamennyi ismert dielektromos jelenséget, azaz a vezetési és a polarizációs folyamatokat is. Ezáltal a szigetelés diagnosztika eszközeivel vizsgálhatjuk a villamos erőtér hatására végbemenő dielektromos folyamatokat. [12]

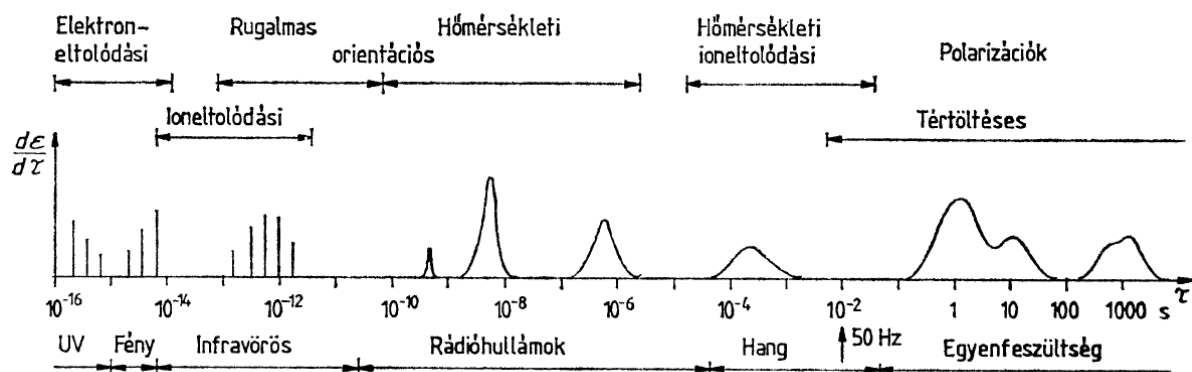


3.2. ábra: Romlási folyamatok és villamos jellemzők kapcsolata [12]

Az alapvető dielektrikus folyamatok: az átütés, a polarizáció és a vezetés. A szigetelő anyagokban az átütés, csak nagy térerősség esetén jön létre, míg a polarizáció és vezetés villamos jelenségeket kis térerők esetén is megfigyelhetjük. A vezetés jelensége szigetelőanyagokban általában kataforetikus vagy ionos vezetés, ritkább esetben elektronvezetés. A műanyag szigetelésekben történő vezetés erősen függ a polimer alapanyag nedvesség tartalmától és annak hőmérsékletétől, ez utóbbit a 2.1. ábra is jól mutatja. [2] A polimer szigetelőanyagok, így a poli(vinil-klorid) dielektrikus vezetéssel kapcsolatos tulajdonságait is jól jellemezhetjük a fajlagos ohmos vezetőképességgel ($\gamma \left[\frac{1}{\Omega cm} \right]$ v. $\left[\frac{A}{V cm} \right]$) vagy a fajlagos térfogati ellenállással ($\rho \left[\Omega cm \right]$), mely fizikai mennyiségek egymás reciprokai. [8]

3.3. Polarizáció és fajtái

A polarizációs folyamatoknak több fajtája ismert, de ami mindannyiban közös, hogy a villamos erőtér hatására korlátozottan elmozduló töltéshordozók a hatás megszűnése után visszatérnek az eredeti állapotukba. Ezen jelenségek időbeli lefutása közel exponenciális jelet mutat. Villamos polarizációról akkor beszélhetünk, ha az anyagban eltolódnak azok az ellentétes töltések, melyek alapesetben semlegesítik egymást, ha nem hat rájuk külső erőtér. A polarizációs vezetéshez hasonlóan hőmérséklet és nedvességtartalom függő, de mindemellett befolyásolja az alapanyagban található töltéshordozók tömege is. A szigetelőanyagokban a polarizáció időállandó-tartománya nagyon széles, 10^{-13} és 10^4 másodperces nagyságrendek között változhat. [8]



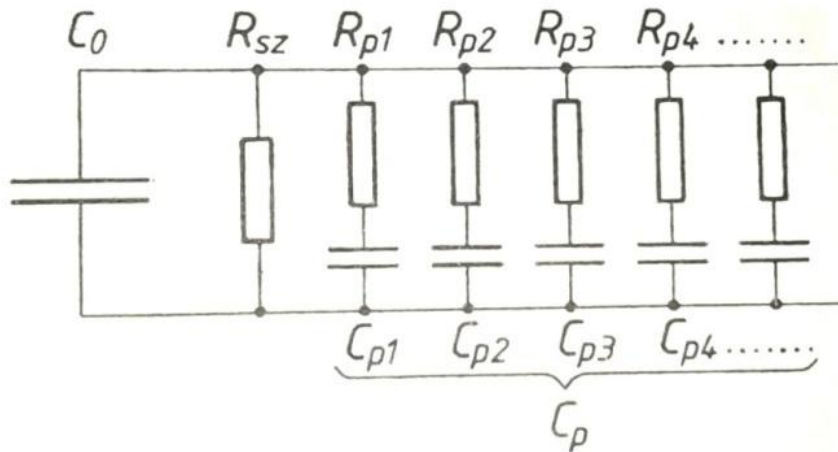
3.3. ábra: Polarizációs spektrum [13]

A polarizációs jelenségek fajtáit az időállandójuk szerint különböztethetjük meg, ezt a 3.3. ábra is mutatja. Az legkisebb időállandójú polarizációs jelenség a külső villamos erőtér hatására létrejövő *elektron-eltolódás*. Elektron-eltolódásról akkor beszélhetünk, ha a szigetelőanyag atomjainak negatív töltésű elektronjai ellentétes irányba igyekeznek mozogni, mint a pozitív töltésű atommag. Emiatt az „eltolódás” miatt az atom torzul. Molekuláris anyagok esetén is ez így történik, de szerkezet

változás nincs. A második polarizációs folyamatot a szintén villamos erőtér hozza létre ez az *ion-eltolódás*. Az ion-eltolódás ionos kötésű szigetelőanyagoknál fordulhat elő, ekkor a molekulákon belüli ionok tolódnak el. Ezt a rugalmas orientációs polarizáció követi, melynek időállandója 10^{-8} és 10^{-10} s közötti érték. A következő jelenség a *hőmérséklet orientáció*, mely erősen hőfokfüggő, majd *ionos hőmérséklet polarizáció*, mely kizárólag szilárd anyagokban figyelhető meg. Az ionok vándorlását hőmozgás okozza, a villamos erőtér csak a tendenciáját határozza meg a vándorlásnak. A spektrumon az utolsó polarizáció a *tértöltéses polarizáció* vagy más néven elektród polarizáció jelensége. Ennek egyik fajtája a *határréteg polarizáció*, mely különböző anyagok határrétegein jöhet létre. [8], [14], [15]

4. Szigetelőanyagok helyettesítő kapcsolása és alkalmazása

A szigeteléseket egyenfeszültségű és váltakozófeszültségű vizsgálati módszerekkel egyaránt vizsgálhatjuk. A mérések során két egyenfeszültségű vizsgálati módszert alkalmaztunk, a szivárgási áram mérést és a teljes feszültség válasz mérésének módszerét. A mérési eljárások alapját a szigetelők helyettesítő kapcsolása adja, ezt a modellt használjuk a kiértékelés során is.



4.1. ábra: Szigetelőanyag helyettesítő kapcsolása [8]

A szigetelőanyagok dielektromos folyamatainak modellezésénél használt helyettesítő kapcsolási ábrát a 4.1. ábra mutatja. A helyettesítő kapcsolásban a C_0 a szigetelés geometriai kapacitását, míg az R_{sz} a szigetelési ellenállást jelképezi, az R-C tagok pedig a szigetelőanyagban végbemenő eltérő időállandójú elemi polarizációkat. A soros C_p kapacitások az adott elemi polarizáció által kötött töltés mennyiséggel arányosak. A helyettesítő vázlat soros R_{pn} - C_{pn} tagjainak felhasználásával a következő képlet írja le a n -edik elemi polarizáció T_k időállandóját [8]:

$$T_k = C_{pn} \cdot R_{pn} . \quad (4.1)$$

4.1. Szivárgási áram mérésének módszere és alkalmazása

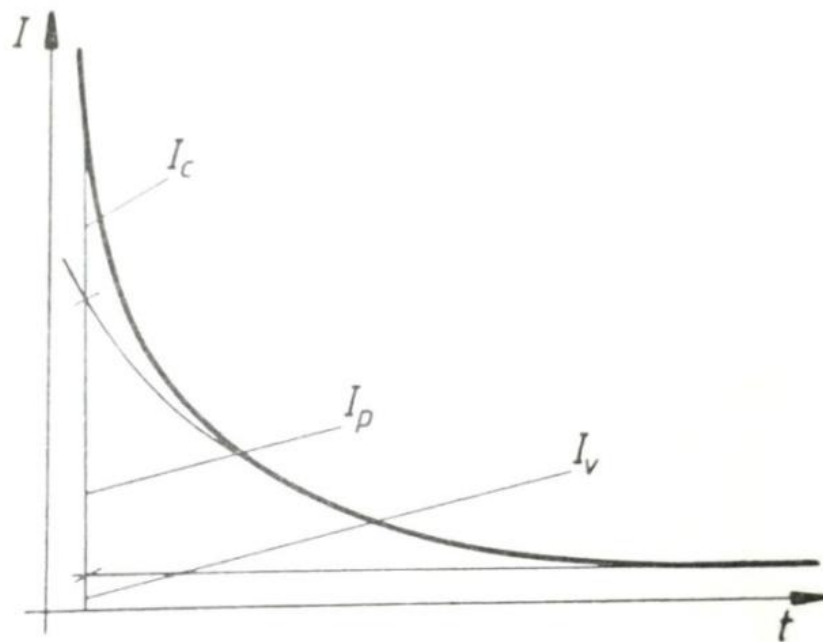
A szivárgási áram mérés lehetővé teszi a szigetelési ellenállás mérését, úgy ismert vizsgálati feszültség mellett mérjük a szigetelésen átfolyó áram értékét. A szivárgási áram, és a vizsgálati feszültség valamint az anyagminta geometriájának ismeretének kiszámítható a fajlagos ohmos vezetőképesség ($\gamma \left[\frac{1}{\Omega cm} \right]$) és a fajlagos térfogati ellenállás ($\rho \left[\Omega cm \right]$).

A szigetelésen átfolyó áram értéke időben változhat a már ismertetett modellben található abszorpciós és kapacitív elemek miatt. Várhatóan a szigetelőanyag töltőárama először csökken, majd beáll egy adott értékre, ahol a fajlagos térfogati ellenállást is

értelmezzük. Az egységnyi felületre vonatkoztatott szivárgási áram időfüggvénye, J_t ez alapján összetevőkre bontható:

$$J_t(t) = J_c(t) + J_p(t) + J_v, \quad (4.2)$$

ahol a $J_c(t)$ kapacitív összetevő, a $J_p(t)$ polarizációs összetevő, a J_v pedig a vezetési összetevő. A kapacitív töltőáram a szigetelés geometria kapacitásával arányos, tehát a helyettesítő kapcsolás C_0 elemének töltőáramával. A polarizációs töltőáramot az elemi polarizációk befolyásolják, így a 4.1. ábra soros $R_{pn}-C_{pn}$ tagjai. Végül a J_v vezetési összetevő a R_{sz} a szigetelési ellenálláson átfolyó áramnak feleltethető meg. A szivárgási áram időbeli változását és összetevőit a 4.2. ábra mutatja. [8]



4.2. ábra: A szigetelőanyag töltőáramának összetevői az idő függvényében
(I_c - kapacitív töltőáram, I_p - Polarizációs áram, I_v - vezetési áram) [8]

A kapacitív összetevő nem ad információt a dielektromos viselkedésre és kis időállandója miatt, a vizsgálat során elhanyagolható, így a szivárgási áram egyenlete a következőképp módosul [8]:

$$J(t) = J_p(t) + J_v = E \cdot \beta + E \cdot \gamma, \quad (4.3)$$

ahol az E [V/cm] a villamos térerősség, a β $\left[\frac{A}{Vcm}\right]$ a polarizációs vezetőképesség, a γ $\left[\frac{A}{Vcm}\right]$ az ohmos vezetőképesség. A szivárgási áram értékének beállítását követően, pedig meghatározható az ohmos vezetőképesség [8]:

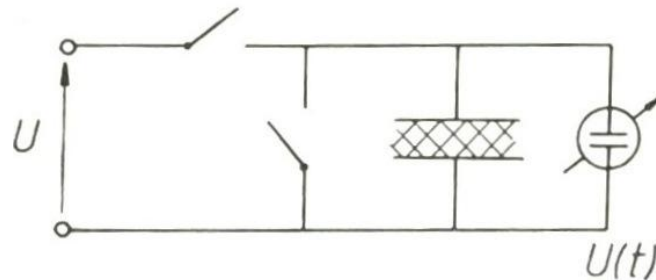
$$\gamma = \frac{J(\infty)}{E} = \frac{1}{\rho}, \quad (4.4)$$

és a polarizációs vezetőképesség [8]:

$$\beta = \frac{J_p(0)}{E} = \frac{J(0) - J(\infty)}{E}. \quad (4.5)$$

4.2. Teljes feszültség válasz módszere és alkalmazása

A teljes feszültség válasz vizsgálati módszer két részből áll, a kisülési és visszatérő feszültség görbék méréséből. A mérés alapja, hogy egy feszültség egységugrásra adott válaszból következtünk a dielektromos jellemezőkre. A mérés elvi kapcsolási rajzát a 4.3. ábra mutatja.



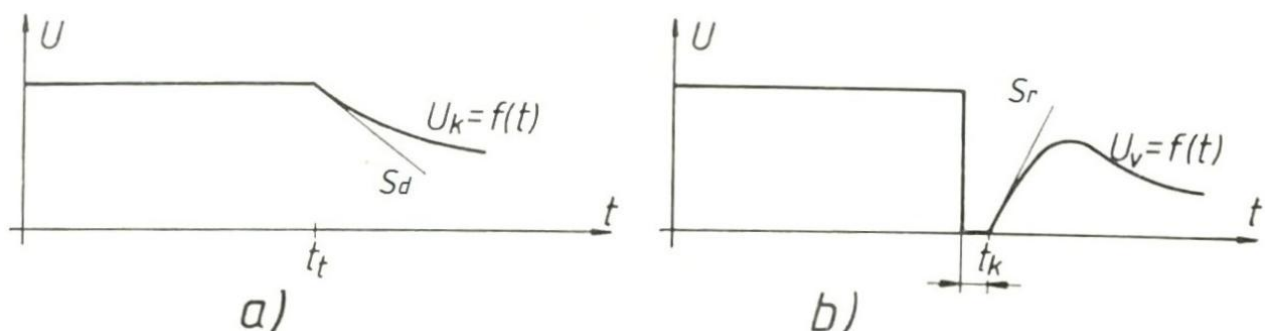
4.3. ábra: A feszültség mérés módszerének elvi kapcsolási rajza [8]

A kisülési feszültség görbéje a 4.4. ábra a) részén látható, ekkor a szigetelésre t_t töltési időre U vizsgálati feszültséget kapcsolunk, majd erről leválasztjuk és mérjük a válaszfüggvény kezdeti meredekségét az S_d -t, azaz a kezdeti feszültség változás sebességét. Ennek értéke a szigetelőanyag vezetőképességétől (γ) függ, ezt az összefüggést a következő egyenlet írja le:

$$S_d = \left| \gamma \frac{U}{\varepsilon_0} \right| = \left| \frac{U}{T_d} \right| = \left| \frac{U}{R_{sz} \cdot C_0} \right|, \quad (4.6)$$

ahol az $S_d \left[\frac{V}{s} \right]$ a kisülési feszültség válasz kezdeti meredeksége, az U vizsgálati vagy töltő feszültség, az $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-14} \left[\frac{As}{Vcm} \right]$ pedig a vákuum permittivitása. Ezek alapján a szigetelőanyag ohmos vezetőképessége a következőképpen számítható [8]:

$$\gamma = \varepsilon_0 \frac{|S_d|}{U} \left[\frac{A}{Vcm} \right]. \quad (4.7)$$



4.4. ábra: A teljes feszültség válasz feszültség görbéi:
a) a kisülési feszültség válaszfüggvénye, b) a visszatérő feszültség válaszfüggvénye [8]

A visszatérő feszültség válaszfüggvénye a 4.4. ábra b) részén látható. Ez a görbe a vizsgált minta kisülése után mérhető, ezt a visszatérő feszültséget az anyagban vége menő polarizációs folyamatok okozzák. Ez alapján a visszatérő feszültség válaszfüggvény kezdeti meredekségének (S_r) mérésével meghatározható az anyag polarizációs vezetőképessége (β), e két mennyiség közötti kapcsolatot a következő egyenlet mutatja [8]:

$$S_r = \beta \frac{U}{\varepsilon_0} = \frac{U}{T_r} = \frac{U}{R_p \cdot C_0} \left[\frac{V}{s} \right]. \quad (4.8)$$

Tehát ebből kifejezve a polarizációs vezetőképesség:

$$\beta = \varepsilon_0 \frac{S_r}{U} \left[\frac{A}{Vcm} \right]. \quad (4.9)$$

5. A vizsgált PVC minták tulajdonságai

A vizsgálatokhoz négy darab, különböző lágyító tartalmú PVC lapocskát használtunk ahhoz, hogy megfigyelhessük a lágyítótartalom dielektromos tulajdonságokra gyakorolt hatását. A minták di(etil-hexil)-ftalátot, más néven di-oktil-ftalátot tartalmaznak, melynek megnevezésére a későbbiekben a DOP rövidítés használok. A négy darab anyagminta lágyítótartalma a következőképp változik: a *DOP 0*-s minta nem tartalmaz lágyítót, a *DOP 30*-os minta 30% súlyrészben tartalmaz lágyítót, míg a *DOP 40*-es 40% súlyrészben, a *DOP 50*-es pedig 50% súlyrészben. [16]

A villamos vizsgálatok elvégzéséhez nélkülözhetetlen a vizsgált próbatestek geometriájának ismerete. Ennek oka, hogy a szigetelés fajlagos térfogati ellenállásának meghatározásához szükséges az anyagminták vastagságának értéke. A próbatestek vastagságának mérését tolmérővel végeztük. A négy különböző összetételű minta vastagságának mért értékeit és azok átlagát az 5.1. táblázat tartalmazza. Megfigyelhető, hogy a lágyító tartalom növekedésével a minták vastagsága csökken, ezt valószínűleg a lágyító feldolgozásra gyakorolt hatása okozza.

5.1. táblázat: A vizsgált PVC anyagminták vastagsága

A PVC minták vastagsága					
Minta megnevezése	1. mérés [mm]	2. mérés [mm]	3. mérés [mm]	átlag [mm]	átlag [cm]
DOP 0	1,08	1,22	1,02	1,11	0,111
DOP 30	1,00	0,90	1,00	0,97	0,097
DOP 40	0,92	0,94	0,96	0,94	0,094
DOP 50	0,90	0,90	1,00	0,93	0,093

5.1. A vizsgált PVC minták mechanikai tulajdonságai

A vizsgált PVC mintákon keménységmérést végeztünk, hogy pontosan megismerjük a lágyító hatását az anyag mechanikai tulajdonságaira. Összehasonlítás céljából egy már kiserelt erőművi kábelben is végeztünk méréseket. A referenciaként használt PVC szigetelésű kábelt és a *HPE II típusú 63699* szériaszámú Shore-D skálán érvényes keménységmérőt az 5.1. ábra mutatja. A mérés során közel 3 mm vastag mintákat vizsgáltunk. A 50 N erővel terheltük 3 s ideig. A Shore keménységmérés során egy adott ideig terhelni kell a polimer felületét, ennek hátterében az áll, hogy a műanyagokra jellemző mechanikai tulajdonságok időfüggőek, tehát a teljes deformáció, nem a terhelés fellépésével egy időben alakul ki. A Shore D keménységmérő mérőkúpjának szabványos nyílásszöge 30°. A mérés részleteit és a mérőfej pontos geometriáját az ISO 868-es szabvány rögzíti. [17]



5.1. ábra: HPE II típusú Shore-D keménységmérő és az összehasonlítás alapjául szolgáló kábel

A Shore keménységmérés során kapott adatokat az 5.2. táblázat mutatja, mely alapján megállapíthatjuk, hogy a lágyító tartalmának növelésével a polimer alapanyag keménysége csökken. A keménységmérés eredményeiből egyértelműen látszik, hogy a DOP 40-es minta keménysége közelíti legjobban a PVC szigetelésű vezeték köpenyének keménységét. Az összehasonlítás alapját szolgáló kábel PVC szigetelésének keménységénél nagyobb és kisebb keménységű mintát is vizsgáltunk.

5.2. táblázat: A különböző lágyító tartalmú PVC minták és egy PVC kábel Shore-D skálaszerinti keménységei

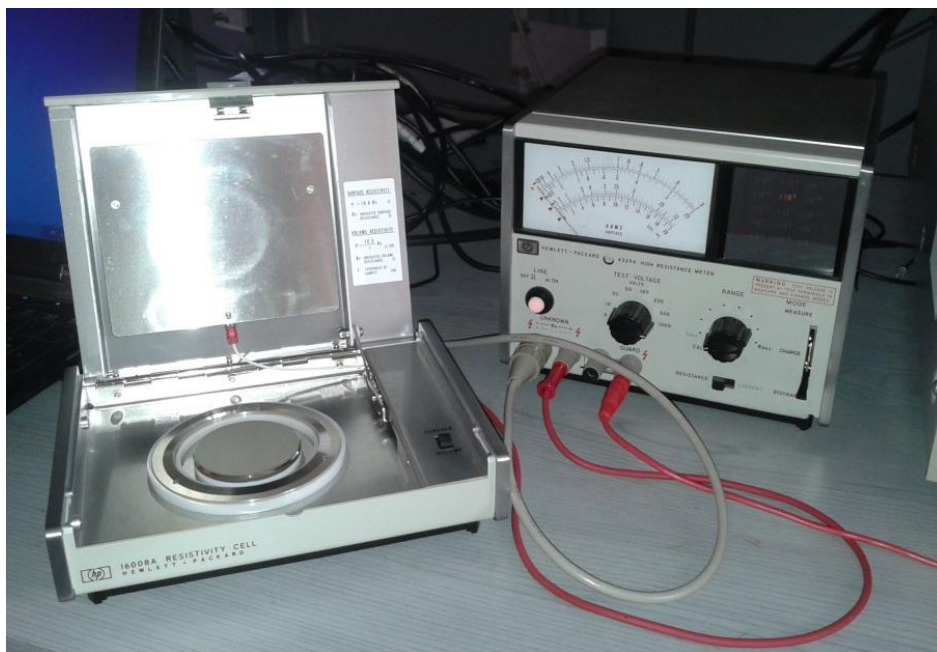
A PVC minták Shore-D keménysége						
Minta	1. mérés	2. mérés	3. mérés	4. mérés	5. mérés	átlag
DOP 0	79,8	78,7	77,9	76,50	78,2	78,2
DOP 30	52,7	55,1	52,0	55,1	49,7	53,7
DOP 40	39,4	41,2	39,9	37,1	38,1	39,1
DOP 50	33,3	32,8	33,6	33,2	31,5	32,9
Kábel	40,0	44,5	41,5	42,8	44,5	42,7

6. Mérések és eredmények

A különböző di-oktil-ftalát tartalmú PVC mintákat szivárgási áram mérésel és teljes feszültségválasz mérésének módszerével vizsgáltuk. A két egymástól eltérő mérési módszer alkalmazásának előnye, hogy összevethetőek a kapott eredmények, így pontosabb képet kapunk a vizsgált szigetelőanyag dielektromos tulajdonságairól.

6.1. Különböző lágyító tartalmú minták vizsgálata szivárgási áram mérésel

A mérés során *HP 4329 A* típusú ellenállás- és szivárgási árammérőt és a hozzátartozó *HP 16008 A* mérőcellát használtunk. Ennek elrendezését a 6.1. ábra mutatja. A *HP 16008 A* mérőcella sík szigetelőanyag minták ellenállásának mérésénél alkalmazható.



6.1. ábra: Az ellenállásmérő és a hozzátartozó mérőcella

A mérést közel állandó $T_{vizsg} = 22,5 \text{ °C}$ körüli vizsgálati hőmérsékleten végeztük, a környezeti hőmérséklet vizsgálat során mért értékeit a mellékletben található 9.1. táblázat tartalmazza. A mérés során vizsgálati feszültség értéke végig $U = 1000 \text{ [V]}$ volt. Az ábrán látható műszerrel közvetlenül a PVC minták szigetelési ellenállását mértük, majd a mért értékekből számoltuk vissza az adott szivárgási áramok értékét. Ezeket a mért és számított adatokat a 9.1. táblázat tartalmazza. A mért ellenállás értékekből meghatározhatóak az egyes anyagminták fajlagos térfogati ellenállás értékei. A 4.1 fejezetben tárgyaltak alapján, az időben változó szivárgási áram beáll egy állandósult értékre amiből, meghatározható a fajlagos térfogati ellenállás és az ohmos

vezetőképesség. A fajlagos térfogati ellenállás (ρ) az állandósult szigetelési ellenállás (R_v) értékéből, így határozható meg [18]:

$$\rho = \frac{19,6}{d} \cdot R_v, \quad (6.1)$$

ahol a d a vizsgált mintadarab vastagsága cm-ben. A minták vastagságát az 5.1. táblázat tartalmazza. Ez alapján meghatározható a következő összefüggéssel az egyes próbatestek ohmos vezetőképessége $\left[\frac{A}{Vcm}\right]$ -ben:

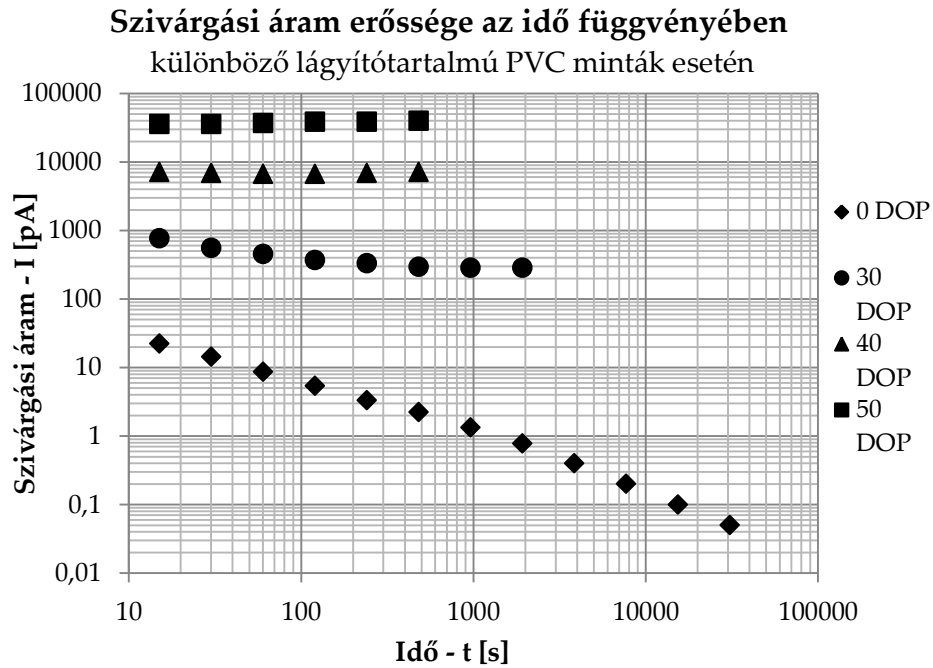
$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (6.2)$$

Az (6.2) egyenlet alapján a különböző PVC lapok ohmos vezetőképességét a 6.1. táblázat tartalmazza. A DOP 0-s próbatest szigetelési ellenállása nem érte el az állandósult értéket a mérés során. Ennek oka, hogy a minta ellenállása olyan magas, hogy kiesik a mérőműszer mérési tartományából. Így annak vezetőképességét nem lehet pontosan meghatározni a mért adatok alapján, ezért nem szerepel ellenállás érték a DOP 0-s minta sorában.

6.1. táblázat: PVC minták fajlagos térfogati ellenállása és ohmos vezetőképessége

PVC minták fajlagos térfogati ellenállása és ohmos vezetőképessége				
Minta megnevezése	$R_{v, cont}$ [G Ω]	d [cm]	ρ [Ωcm]	γ [A/(Vcm)]
DOP 0	-	0,111	-	-
DOP 30	3500	0,097	$7,07 \cdot 10^{14}$	$1,41 \cdot 10^{-15}$
DOP 40	145	0,094	$3,02 \cdot 10^{13}$	$3,31 \cdot 10^{-14}$
DOP 50	27	0,093	$5,69 \cdot 10^{12}$	$1,76 \cdot 10^{-13}$

A mért értékek alapján meghatározott szivárgási áramokat az idő függvényében a 6.2. ábra mutatja. Az értékek logaritmikus sálán vannak ábrázolva. A diagram alapján egyértelműen megállapítható, hogy a lágyító adalék mennyiségének növelésével a PVC szigetelőanyag vezetőképessége nagyságrendekkel nő. A vezetőképesség drasztikus növekedése miatt, a nagy DOP tartalmú mintákban a vezetés teljesen elfedi a kis időállandójú polarizációs folyamatokat. Ez az oka annak, hogy a DOP 40-es és DOP 50-es minták esetében nem figyelhető meg a szivárgási áram csökkenése, sőt egy minimális növekedést is tapasztalhatunk. Bár a diagramon az áram értéke konstansnak tűnik, a mellékletben található 9.1. táblázat adataiból jól látszik a kismértékű növekedés. A szivárgási áram növekedését valószínűleg a szigetelőanyagon keresztül folyó áram hatására történő melegedés okozta, hisz a dielektromos folyamatok erősen hőmérsékletfüggőek a polimer alapú szigetelőanyagokban.

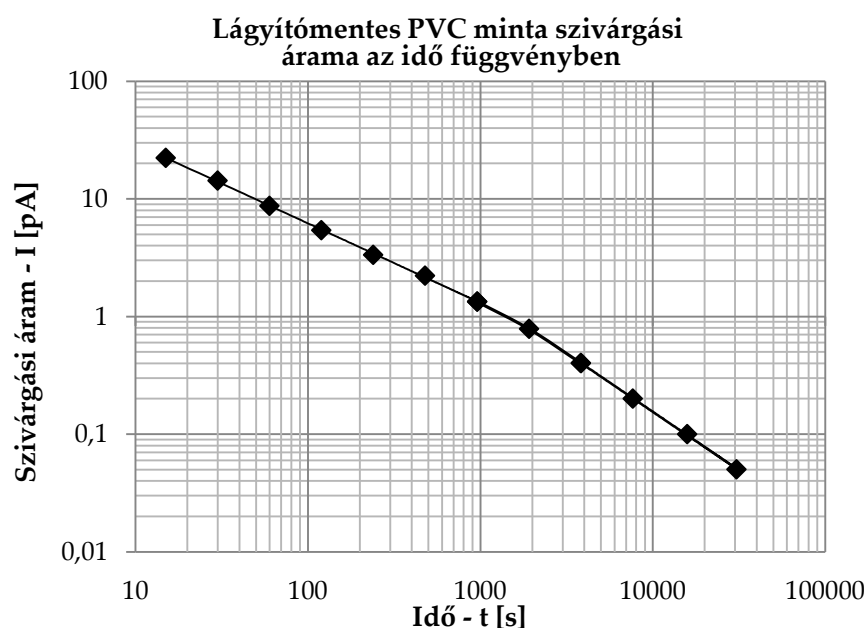
6.2. ábra: A különböző lágyító tartalmú minták $I(t)$ karakterisztikája

A mérés során a lágyítómentes minta esetében azt tapasztaltuk, hogy szivárgási áram nem érte el az állandósult értéket. A kapott görbe felbontható két eltérő meredekségű egyenesre, a diagramot a 6.3. ábra mutatja. A két egyenes metszés pontjában a szivárgási áram értéke:

$$I = 0,938 \cdot 10^{-12} [A], \quad (6.3)$$

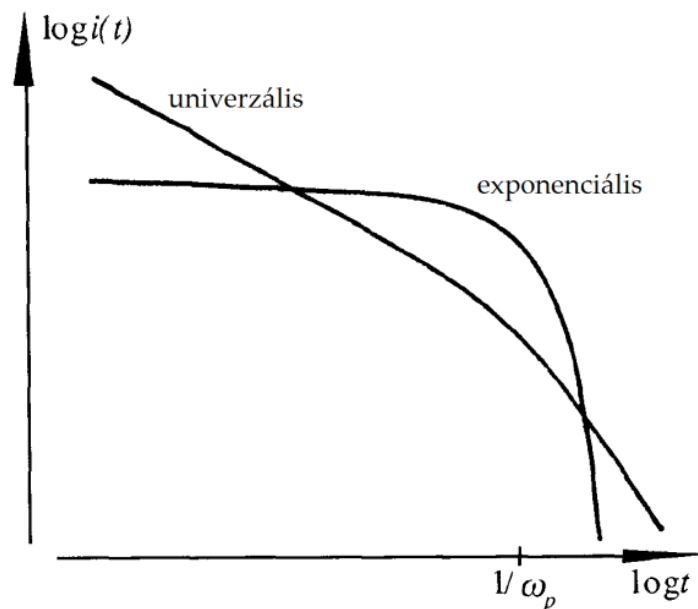
amit a következő időpontban ér el:

$$t = 1631,11 [s]. \quad (6.4)$$



6.3. ábra: A DOP 0-s minta esetén mért áram-idő függvény

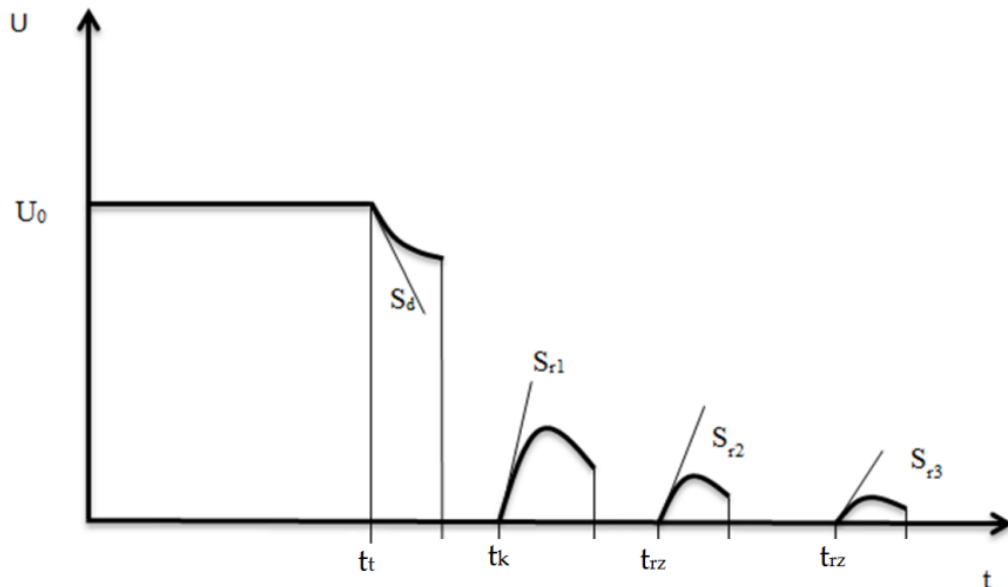
A DOP 0-s anyagminta 6.3. ábra által illusztrált viselkedését, Andrew K Jonscher már több különböző polimer anyag esetén megfigyelte. Ezt a jelenséget *dielektromos relaxációnak* nevezte el. A megnevezés háttérében a polimerek egyik időfüggő mechanikai viselkedése áll, a feszültség relaxáció. A feszültség relaxáció és a kúszás jelensége egyaránt a polimerek elasztoplastikus mechanikai viselkedésével magyarázható. A feszültség relaxáció estében egységugrás jellegű deformációra adott mechanikai feszültség válasz egy időben folyamatosan csökkenő függvény, ezzel vont analógiai párhozamot Jonscher a dielektromos relaxáció megnevezés használatával. A Jonscher által megalkotott elméleti görbét a 6.4. ábra mutatja, ahol az $1/\omega_p$ a frekvencia független C_0 és R_{sz} tagok által meghatározott időállandó. [19], [20]



6.4. ábra: A szivárgási áram idő függvény logaritmus [21]

6.2. A PVC minták vizsgálata a teljes feszültségválasz módszerével

Az általunk végzett mérés a 4.2 fejezetben leírtakhoz képest kismértékben eltér. A már ismertetett mérést annyiban módosítottuk, hogy a visszatérő feszültségválasz függvény meredekségét nem csupán egyszer, a kisülés után mérjük, hanem többszöri rövidzárás után. A kisülési feszültség válasz kezdeti meredekségének (S_d) mérésében nem volt semmilyen változtatás, a t_t töltési idő leteltével mértük. A visszatérő feszültség válaszfüggvény kezdeti meredekségének (S_r) mérése viszont úgy módosult, hogy t_k kisülési időt követően egyre hosszabb t_{rz} rövidzárási időket alkalmaztunk, és mértük a visszatérő feszültség változás kezdeti sebességeit. Az így kapott elméleti válaszfüggvényt a 6.5. ábra mutatja.



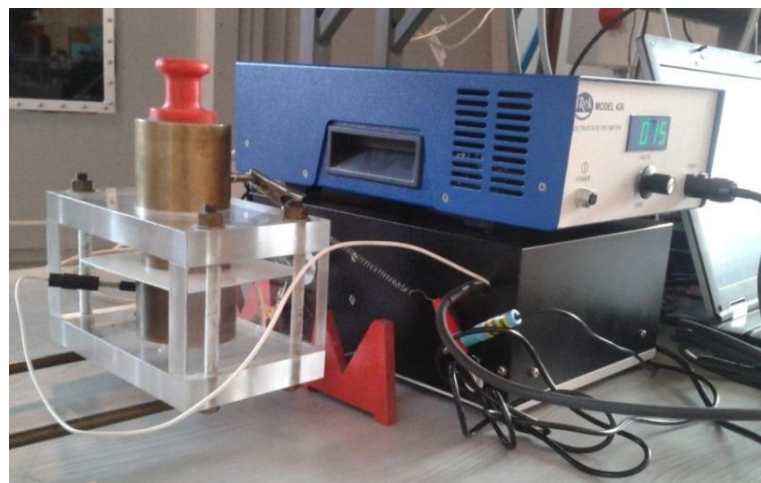
6.5. ábra: Módosított teljes feszültségválasz módszerének válaszfüggvénye [22]

A mérési elrendezést a 6.6. ábra mutatja. Az adatok regisztrálása és kiértékelése számítógéppel történt. A mérés során közel állandó $T_{vizsg} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli vizsgálati hőmérsékleten volt, mely pontos értékeit a 9.2. táblázat tartalmazza. A mérés során a következő paramétereket alkalmaztuk:

vizsgálati feszültség: $U = 1000\text{ [V]}$

töltési idő $t_t = 4000\text{ [s]}$

teljes vizsgálati idő $t_{rz20} = 2000\text{ [s]}$



6.6. ábra: A teljes feszültségválasz mérési módszernél alkalmazott mérési elrendezés

A kisülési feszültségválaszok kezdeti meredekségeiből (S_d) kiszámíthatóak az adott PVC mintákra jellemző elméleti ohmos vezetőképességek (γ_e). Az elméleti vezetőképesség meghatározásához szükséges összefüggést a (4.7) egyenlet írja le.

A kisülési feszültségválaszok kezdeti meredekségének mért adatait, és az egyes minták meghatározott elméleti ohmos vezetőképességét a 6.2. táblázat tartalmazza. A táblázatban szereplő elméleti ohmos vezetőképességek nem veszik figyelembe a szigetelések permittivitását.

6.2. táblázat: A kisülési feszültség válaszból és az abból számított ohmos vezetőképesség

A kisülési feszültség válaszból és az abból számított elméleti ohmos vezetőképesség				
Minta	S_d [V/s]	U [V]	ϵ_0 $\left[\frac{As}{Vcm} \right]$	γ_e $\left[\frac{A}{Vcm} \right]$
DOP 0	-0,185	1000	$8,86 \cdot 10^{-14}$	$1,64 \cdot 10^{-17}$
DOP 30	-1,484	1000	$8,86 \cdot 10^{-14}$	$1,31 \cdot 10^{-16}$
DOP 40	-27,967	1000	$8,86 \cdot 10^{-14}$	$2,48 \cdot 10^{-15}$
DOP 50	-147,539	1000	$8,86 \cdot 10^{-14}$	$1,31 \cdot 10^{-14}$

A kisülési feszültség válaszból és a geometriai kapacitás értékekből a (4.6) egyenlet rendezésével kiszámíthatóak az egyes PVC lapok szigetelési ellenállásai (R_{sz}). A (4.6) egyenlet rendezett alakja:

$$R_{sz} = \frac{U}{C_0 \cdot S_d}. \quad (6.5)$$

A kapacitás meghatározása mért adatok alapján történik. A mérés során Tecpel LCR 612 típusú kapacitásmérőt alkalmaztunk. Kapacitásmérővel mértük a mérési elrendezés (6.6. ábra) $C_{szórt}$, minta nélküli szórt kapacitását, és a C_{telj} , mintával közös teljes kapacitását, ez utóbbi megadja a minta C_0 geometriai kapacitását. A meghatározott szigetelési ellenállás értékeket a 6.3. táblázat tartalmazza. A táblázat adatai alapján jól látszik, hogy a DOP lágyító mennyiségének növelésével csökken a PVC szigetelési ellenállása.

6.3. táblázat: A mért kapacitás és számított szigetelési ellenállás értékek

A szigetelési ellenállás a kisülési feszültség válasz és geometriai kapacitás alapján					
Minta	S_d [V/s]	C_{telj} [pF]	$C_{szórt}$ [pF]	C_0 [pF]	R_{sz} [G Ω]
DOP 0	-0,185	38,1	4,8	38,1	141874,2
DOP 30	-1,484	48,7	5,6	48,7	13836,8
DOP 40	-27,967	58,2	5,7	58,2	614,4
DOP 50	-147,539	67,5	5,8	67,5	100,4

A szigetelési ellenállásból visszaszámolható szigetelőanyagra jellemző fajlagos térfogati ellenállás értéke és abból a fajlagos ohmos vezetőképesség. A szigetelési

ellenállás és fajlagos térfogati ellenállás közti összefüggést a következő egyenlet mutatja:

$$R_{sz} = \rho \cdot \frac{d}{A} = \rho \cdot \frac{d}{\frac{D^2 \cdot \pi}{4}}, \quad (6.6)$$

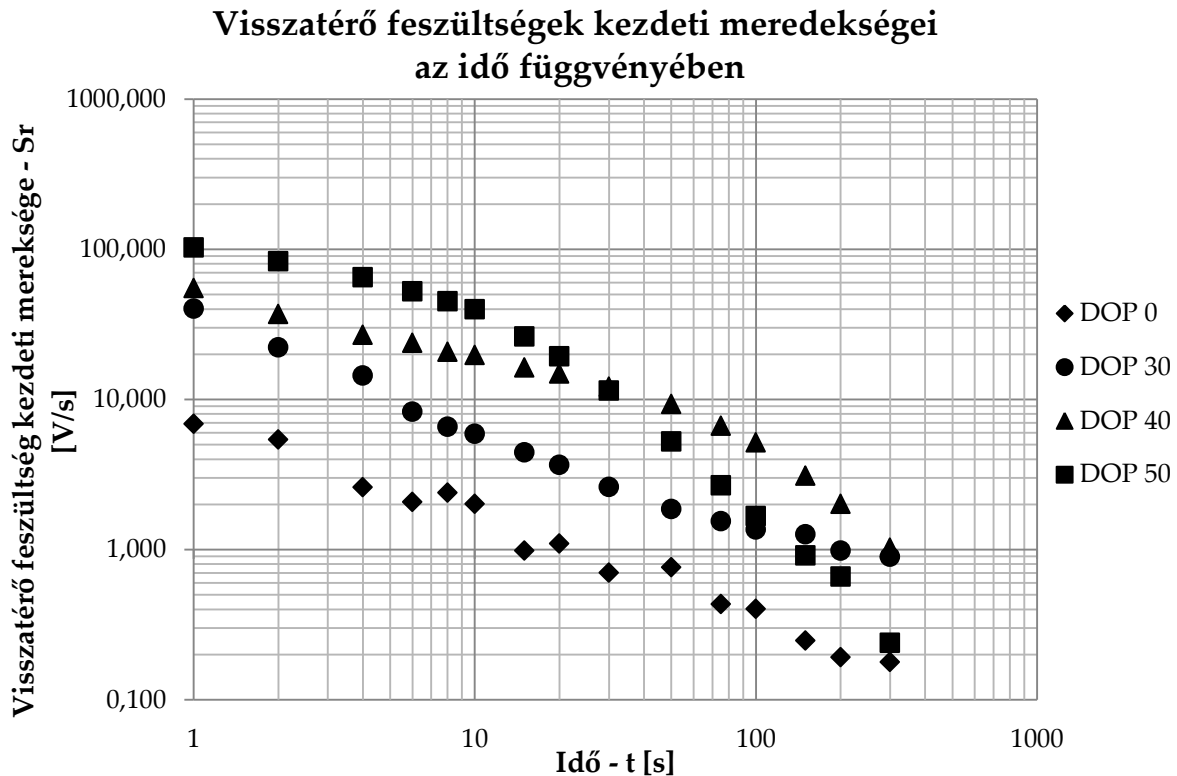
Ahol a d [cm] az adott PVC lap vastagsága, melynek mért értékeit az 5.1. táblázat tartalmazza. A D [cm] az elektród átmérőjét jelöli, mely elektród a 6.6. ábrán a mérési elrendezésben látható, az A [cm²] pedig az elektród és a szigetelőanyag érintkezési felülete. Ezek alapján a (6.2) egyenlet szerint határozhatóak meg a kisülési feszültségválasz méréséből kapott ohmos vezetőképességek. A (6.6) egyenlet alapján meghatározott fajlagos térfogati ellenállás értékeket és az abból számított fajlagos ohmos vezetőképesség értékeket a 6.4. táblázat tartalmazza.

6.4. táblázat: A kisülési feszültség válasz mérés adataiból számított ohmos vezetőképesség

A kisülési feszültség válasz mérés adataiból számított ohmos vezetőképesség						
Minta	R_{sz} [GΩ]	d [cm]	D [cm]	A [cm ²]	ρ [$\frac{V_{cm}}{A}$]	γ [$\frac{A}{V_{cm}}$]
DOP 0	141874,2	0,111	3,56	9,926	$1,27 \cdot 10^{16}$	$7,88 \cdot 10^{-17}$
DOP 30	13836,8	0,097	3,56	9,926	$1,42 \cdot 10^{15}$	$7,06 \cdot 10^{-16}$
DOP 40	614,4	0,094	3,56	9,926	$6,49 \cdot 10^{13}$	$1,54 \cdot 10^{-14}$
DOP 50	100,4	0,093	3,56	9,926	$1,07 \cdot 10^{13}$	$9,33 \cdot 10^{-14}$

A polarizációs folyamatokról a visszatérő feszültség mérés ad információt. A visszatérő feszültség válaszfüggvény kezdeti meredekségét (S_r) különböző rövidzárási idők után mértünk (t_{rz}). A mért adatokból meghatározhatóak a különböző időpontokhoz tartozó polarizációs vezetőképességek (β). A különböző lágyító tartalmú PVC minták esetén mért feszültség válaszfüggvény meredekségeket és a belőlük meghatározott adott időállandót jellemező polarizációs vezetőképességeket a mellékletben található 9.2. táblázat tartalmazza. A különböző összetételű szigetelőanyagok polarizációs vezetőképességeit a (4.9) egyenlet alapján határoztam meg.

A visszatérő feszültség válaszfüggvény kezdeti meredekségeinek időfüggvényét a különböző minták esetén a 6.7. ábra mutatja. A diagram értékei logaritmikus skálán vannak ábrázolva. Az utolsó öt mért adatot nem tartalmazza a diagram, mert kis értékük miatt nagy abszolút hiba terheli őket, így nagy a szórásuk. A mellékletben található 9.2. ábra tartalmazza az összes visszatérő feszültség meredekséget az idő függvényében a különböző PVC minták esetén.



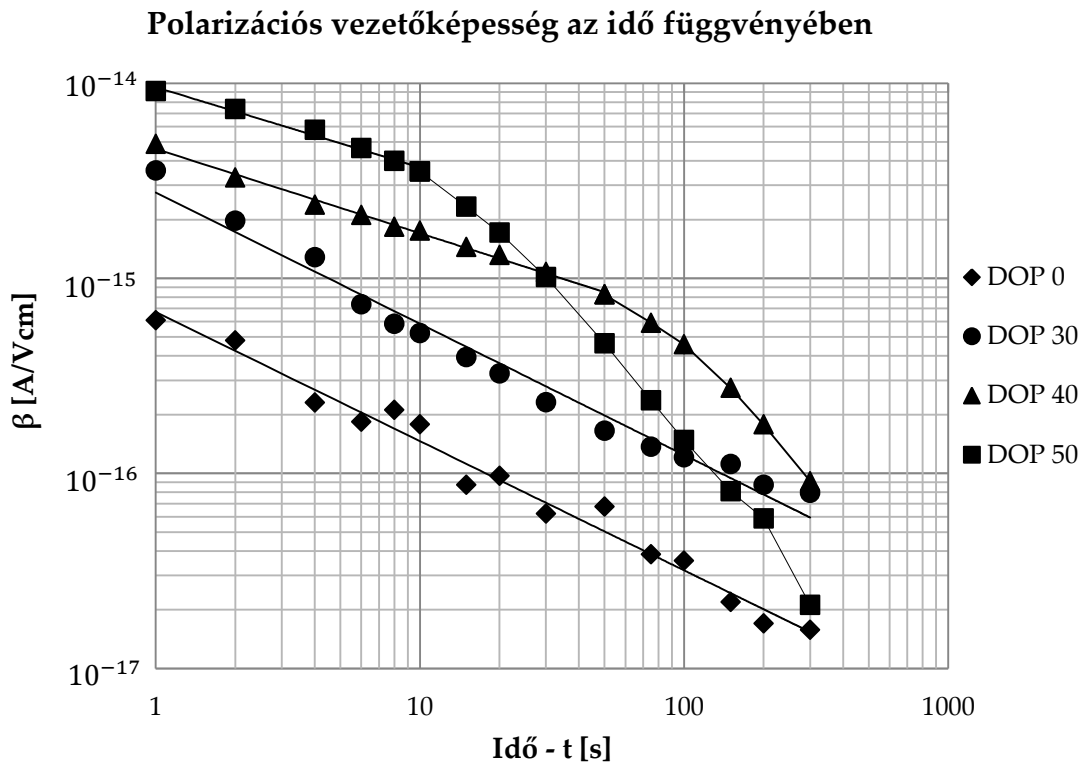
6.7. ábra: Visszatérő feszültségek kezdeti meredekségei az időfüggvényében

A diagramról (6.7. ábra) jól látszik, hogy a lágyító a visszatérő feszültség meredekségére, azaz a polarizációs folyamatokra is hasonló hatással van, mint a frekvencia független összetevőkre. Mindemellett az is megfigyelhető, hogy a nagy lágyítótartalmú szigetelések görbéinek lefutása különbözik a kisebb lágyítótartalmú és lágyítótmentes mintákéhoz képest.

6.3. A két módszer által adott eredmények összevetése

A szivárgási áram mérések eredményei alapján nem kapunk információt a polarizációs folyamatokról, ahogy azt a 6.2. ábra is mutatja. A szivárgási áram mérése során a négy vizsgált mintából a DOP 0-s szivárgási áram értéke nem érte el az állandósult állapotot, míg a DOP 50-es és DOP 40-es minták esetében a vezetési jelenségek elfedték a polarizációs jelenségeket. Így ezen minták esetén nem határozható meg a polarizációs vezetőképesség a szivárgási áram mérése alapján.

A visszatérő feszültség mérési módszer viszont pontosabb képet ad a polarizációs folyamatokról. A visszatérő feszültség meredekségek alapján meghatározott polarizációs vezetőképességek időbeli változását a 6.8. ábra mutatja. A diagramból kiderül, hogy a DOP 50-es polarizációs vezetőképesség időfüggvénye 10 másodpercnél, míg a DOP 40-es mintáé 50 másodperc körül letörik. Ez alapján megállapítható, hogy a szivárgási áram mérése során miért nem voltak mérhetőek ezek a folyamatok, hisz a kis időállandójuk miatt nem voltak érzékelhetőek ezzel a módszerrel.



6.8. ábra: PVC minták polarizációs vezetőképességei az idő függvényében

A két módszer által adott szigetelési ellenállások és ohmos vezetőképességek eredményeit a 6.5. táblázat tartalmazza. Az eredmények nagy eltérést mutatnak, ennek hátterében két dolog állhat. Az egyik, hogy a teljes feszültség válasz mérési módszerének alkalmazása során a geometriai kapacitás értékének mérése 1 kHz frekvencián történt, így nem a valódi geometriai kapacitást mértük, hanem egy a vizsgált lassú polarizációknál gyorsabb polarizációk által torzított értéket. A másik ok, hogy a vizsgálati hőmérséklet 0,5°C-os eltérése is befolyásolja a vezetőképességet. A szigetelési ellenállás értékének meghatározására a szivárgási áram mérés alkalmasabb, mert pontosabb eredményt ad.

6.5. táblázat: A két módszer által adott ohmos vezetőképességek összevetése

	A két módszer által adott szigetelési ellenállások és ohmos vezetőképességek összevetése			
	Szivárgási áram mérés módszere		teljes feszültségválasz módszere	
	R_{sz} [GΩ]	γ [A/(Vcm)]	R_{sz} [GΩ]	γ [A/(Vcm)]
DOP 0	-	-	141874,2	$7,88 \cdot 10^{-17}$
DOP 30	3500,0	$1,41 \cdot 10^{-15}$	13836,8	$7,06 \cdot 10^{-16}$
DOP 40	145,0	$3,31 \cdot 10^{-14}$	614,4	$1,54 \cdot 10^{-14}$
DOP 50	27,0	$1,76 \cdot 10^{-13}$	100,4	$9,33 \cdot 10^{-14}$

A két mérés adatainak és tapasztalatainak összehasonlítása alapján három dolog állapítható meg. Az első, hogy a lágyító mennyiségének növelése drasztikusan növeli a szigetelőanyag vezetőképességét. A második, hogy az eltérő lágyító tartalmú PVC minták dielektromos karakterisztikáinak jellegét is befolyásolja. A két mérés eredményeként kapott időfüggvények nem csak eltolódtak, de torzultak is a különböző lágyítótartalmú próbatestek esetében. Ezt a folyamatot mind a 6.8. ábra mind pedig a 6.2. ábra szemlélteti. Ezt valószínűleg a lágyító polarizációs folyamatokra gyakorolt hatása okozza. Végül megállapítható, hogy míg a szivárgási áram mérése előnyösebb a szigetelési ellenállás vizsgálata esetén, a teljes feszültségválasz mérési módszerrel jobban vizsgálhatóak a polarizációs folyamatok a szigetelőanyagban. A két mérési módszer együttes alkalmazása pontosabb képet ad a vizsgált szigetelőanyag dielektromos tulajdonságairól, mivel a vezetés jelenségéről a szivárgási áram méréseből, a polarizációról pedig a teljes feszültségválasz méréseéből kaphatunk több és pontosabb információt.

7. Összefoglalás

A mérések során alkalmazott két egyenfeszültségű vizsgálati módszer, a szivárgási áram mérése és a teljes feszültség válasz mérésének módszere, sokkal inkább kiegészítik, mint kiváltják egymást. Az előbbi a frekvencia független szigetelési ellenállás megállapítása esetén ad pontos eredményt, míg az utóbbi a polarizációs folyamatok feltérképezését segíti. Tehát a PVC dielektromos tulajdonságainak vizsgálata során a vezetés jelenségéről a szivárgási áram mérés, a polarizációról pedig a teljes feszültségválasz mérés ad pontosabb képet, így együttes alkalmazásuk legelőnyösebb a dielektromos folyamatok vizsgálatánál.

A mérések során igazoltuk egy lágyító adalék szigetelési ellenállásra gyakorolt rontó hatását PVC minták esetén, és megfigyelhettük, hogy polarizációs folyamatokat is befolyásolja a lágyító jelenléte. A lágyító mennyiségének növelése a PVC szigetelésben együtt jár az anyag fajlagos ohmos vezetőképességének és polarizációs vezetőképességének nagyságrendekkel történő növekedésével. A lágyító PVC-re gyakorolt hatásának pontosabb feltérképezéséhez több különböző lágyítótartalmú minta vizsgálata szükséges. Továbblépési lehetőség még az öregedési folyamatok vizsgálata különböző lágyítótartalmú PVC szigetelések esetén. Mivel a PVC dielektromos tulajdonságait befolyásoló mechanizmusok akár egymással ellentétes hatásokat is kiválthatnak, ezek vizsgálata lényeges információkat adhat a PVC szigetelések viselkedéséről.

8. Irodalomjegyzék

- [1] T. Czvikovszky, P. Nagy, J. Gaál, „4.1.2.1 A polivinilklorid (PVC),” in *A polimertechnika alapjai*, Budapest, Műegyetemi Kiadó, 2003, pp. 70-75.
- [2] H. Péter, „5.2. Poli(vinil-klorid),” in *Eletromos vezetés és polimerizáció műanyagokban*, Budapest, Akadémiai Kiadó, 1969, pp. 185-192.
- [3] D. h. K. Gábor, „MŰSZAKI MŰANYAG FÉLKÉSZ TERMÉKEK-Ismertető sorozat. 7.rész-Anyagcsoport: Poli(vinil-klorid) PVC,” *Műanyagipari Szemle*,. szám4., 2006..
- [4] D. T. Tábi, Szerző, *Polimerek adalékanyagai*. [Performance]. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszék, 2013. szeptember 11..
- [5] Granta Designe Limited, *GRANTA CES EduPack szoftver*, England, 2011.
- [6] T. Czvikovszky, P. Nagy, J. Gaál, „8. Extrúzió,” in *A polimertechnika alapjai*, Budapest, Műegyetemi Kiadó, 2003, pp. 185-188, 218.
- [7] Polimertechnika Tanszék, „A3 – EXTRÚZIÓ,” BME, Budapest, 2014.febr.11..
- [8] T. H. E. Németh, *Nagyfeszültségű szigetelés technika*, Budapest: Tankönyvkiadó, 1990.
- [9] P. Quennehen, I. Royaud, G. Seytre, O. Gain, P. Rain, T. Espilit, S. François, „Determination of the aging mechanism of single core cables with PVC,” *Polymer Degradation and Stability*, kötet119, szám119, pp. 96, 97, 2015.
- [10] C. Richárd, „Szigetelések roncsolásmentes vizsgálata - Mérési útmutató,” BME VET Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport, Budapest, 2012.
- [11] G. Gábor, „Lökőfeszültség-eloszlás vizsgálata transzformátorban - Mérési útmutató,” BME VET Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport, Budapest, 2012.
- [12] T. Á. Zoltán, *KOMPLEX SZIGETELÉSDIAGNOSZTIKA ALKALMAZÁSA KISFESZÜLTÉGŰ KÁBELEKRE (PH.D. ÉRTEKEZÉS)*, Budapest: BME Villamos Energetika Tanszék, 2010.

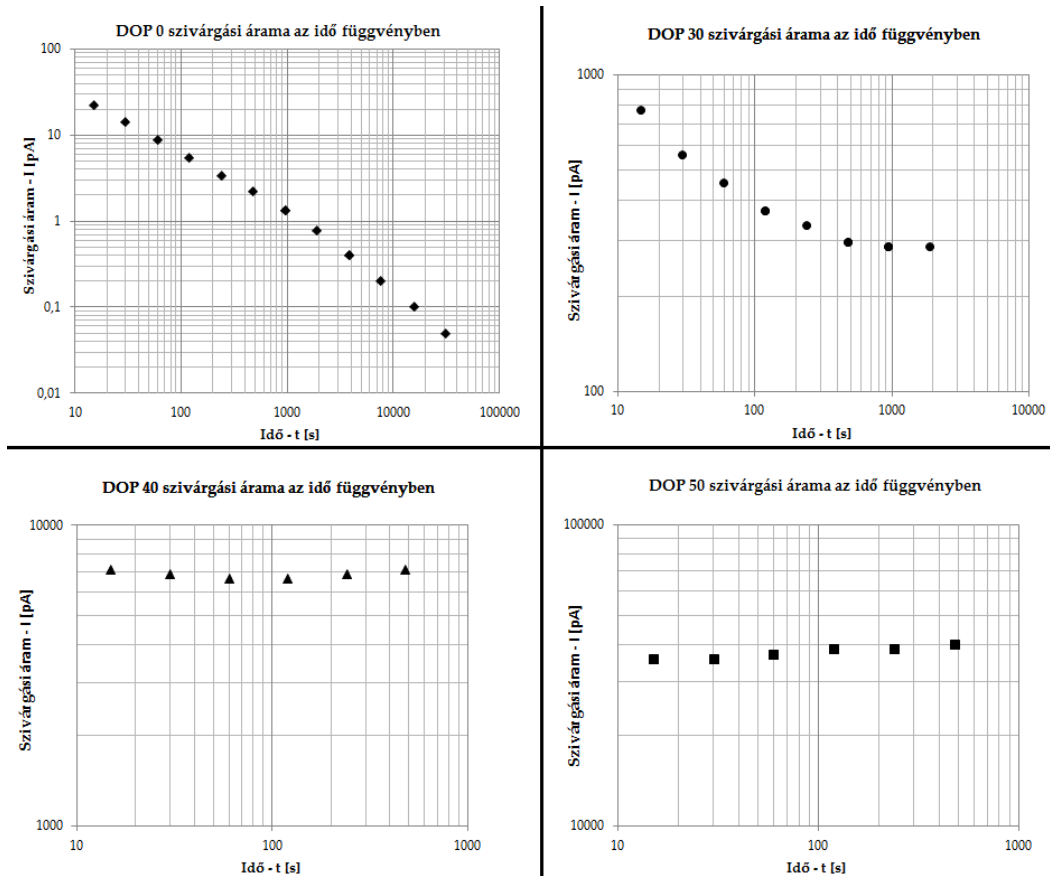
- [13] Műszeroldal Kft., „<http://www.muszeroldal.hu/>,” [Online]. Available: <http://www.muszeroldal.hu/measurenotes/villamosszigetelestechnika.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 21. 10. 2015.].
- [14] A. Csernátony-Hoffer, Nagyfeszültségű technika, Budapest: Tankönyvkiadó, 1978.
- [15] A. Serghei, M. Tress, J. R. Sangoro, d F. Kremer, „Electrode polarization and charge transport at solid interfaces,” *The American Physical Society*, %1. kötet184301, %1. számB 80, pp. 1-5, 2009.
- [16] QuattroPlast Hungary, „Műanyagok „igény szerint” – funkcionális töltőanyagokkal,” *Műanyagipari Szemle*, szám03, p. 5., 3 03. 2011..
- [17] Bareiss Prüfgeratebau GmbH, „Shore D Operating Instructions,” Serial-No.:63699, HPE II.
- [18] Hewlett Packard, *4329A High Resistance Meter Operating and Service Manual*, 1983..
- [19] A. K. Jonscher, „Dielectric relaxation in solids,” *IOPscience*, kötet32. szám32, p. R57–R70, 1999.
- [20] BME POLIMERTECHNIKA TANSZÉK, „Kúszás - POLIMEREK IDŐFÜGGŐ MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI (mérési útmutató),” BME Gépészmérnöki Kar, Budapest, 2014.02.13.
- [21] A. K. Jonscher, „The Universal Dielectric response and its Physical Significance,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, kötetVol. 27 No. 3, pp. 407-411, 1992.
- [22] C. G. Márk, „5.2.5 Továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszer,” in *Polarizációs folyamatok hőmérsékletfüggésének vizsgálta*, Budapest, BME Villamos Energetika Tanszék, 2015, pp. 41-43.

9. Mellékletek

9.1. Szivárgási áram mérés mért adatai

9.1. táblázat: Mért ellenállás értékek és az azokból számított szivárgási áram értékek

Mért ellenállás értékek és az azokból számított szivárgási áram értékek								
0 DOP			30 DOP		40 DOP		50 DOP	
$T_{\text{vizsg}} = 22,5 [^{\circ}\text{C}]$			$T_{\text{vizsg}} = 22,6 [^{\circ}\text{C}]$		$T_{\text{vizsg}} = 22,3 [^{\circ}\text{C}]$		$T_{\text{vizsg}} = 22,4 [^{\circ}\text{C}]$	
t [s]	Rv [G Ω]	I [pA]	Rv [G Ω]	I [pA]	Rv [G Ω]	I [pA]	Rv [G Ω]	I [pA]
15	45000	22,22	1300	769,23	140	7142,86	28	35714,29
30	70000	14,29	1800	555,56	145	6896,55	28	35714,29
60	115000	8,70	2200	454,55	150	6666,67	27	37037,04
120	185000	5,41	2700	370,37	150	6666,67	26	38461,54
240	300000	3,33	3000	333,33	145	6896,55	26	38461,54
480	450000	2,22	3400	294,12	140	7142,86	25	40000,00
960	750000	1,33	3500	285,71	-	-	-	-
1920	1280000	0,78	3500	285,71	-	-	-	-
3840	2500000	0,40	-	-	-	-	-	-
7680	5000000	0,20	-	-	-	-	-	-
15360	10000000	0,10	-	-	-	-	-	-
30720	20000000	0,05	-	-	-	-	-	-

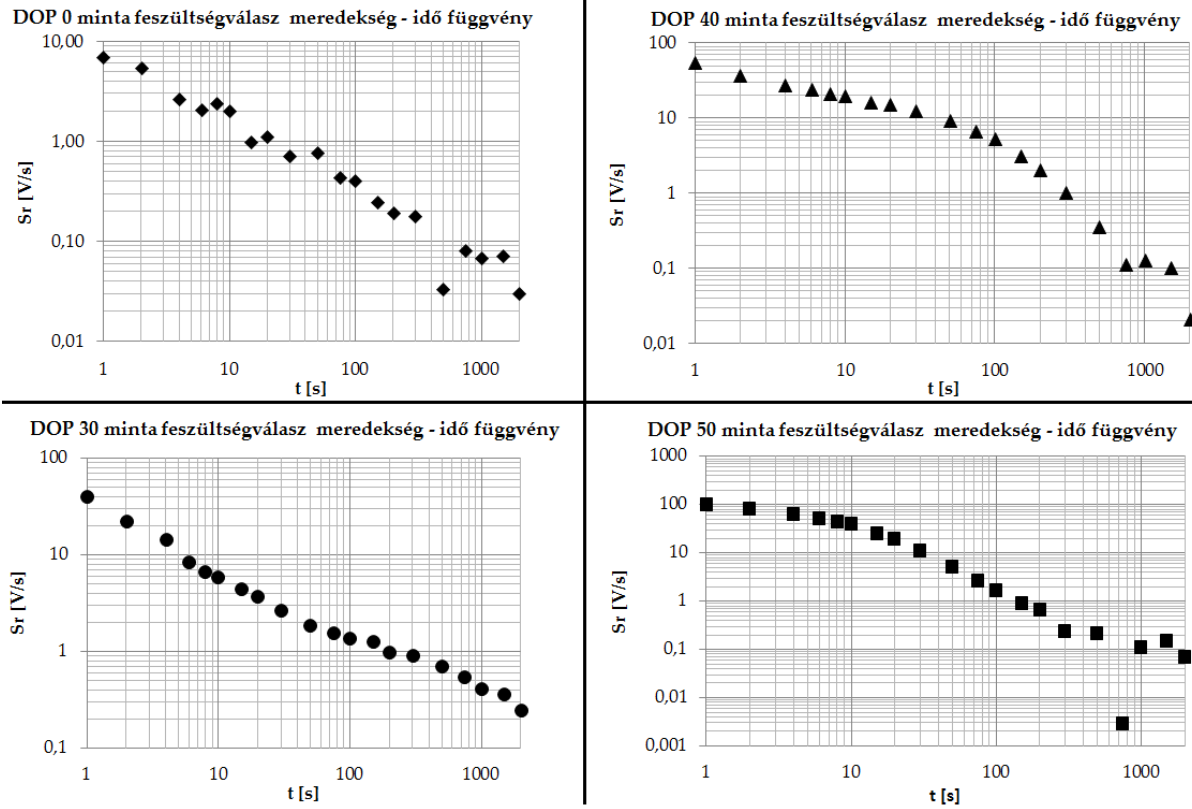


9.1. ábra: Szivárgási áram erőssége az idő függvényében különböző lágyító tartalmú PVC minták eseté

9.2. Teljes feszültségválasz módszer mért és számított adatai

9.2. táblázat: Visszatérő feszültségek kezdeti meredekségei és a belőlük meghatározott polarizációs vezetőképességek

Visszatérő feszültségek kezdeti meredekségei és a belőlük meghatározott polarizációs vezetőképességek									
t [s]	DOP 0		DOP 30		DOP 40		DOP 50		β [A/Vcm]
	Sr [V/s]	β [A/Vcm]	Sr [V/s]	β [A/Vcm]	Sr [V/s]	β [A/Vcm]	Sr [V/s]	β [A/Vcm]	
	T _{vizsg} = 21,9 [°C]		T _{vizsg} = 22,1 [°C]		T _{vizsg} = 22,1 [°C]		T _{vizsg} = 22,0 [°C]		
1	6,860	6,08·10 ⁻¹⁶	40,171	3,56·10 ⁻¹⁵	55,106	4,88·10 ⁻¹⁵	102,696	9,10·10 ⁻¹⁵	
2	5,410	4,79·10 ⁻¹⁶	22,240	1,97·10 ⁻¹⁵	37,028	3,28·10 ⁻¹⁵	83,135	7,37·10 ⁻¹⁵	
4	2,597	2,30·10 ⁻¹⁶	14,442	1,28·10 ⁻¹⁵	26,841	2,38·10 ⁻¹⁵	64,931	5,75·10 ⁻¹⁵	
6	2,071	1,83·10 ⁻¹⁶	8,289	7,34·10 ⁻¹⁶	23,758	2,10·10 ⁻¹⁵	52,335	4,64·10 ⁻¹⁵	
8	2,385	2,11·10 ⁻¹⁶	6,575	5,83·10 ⁻¹⁶	20,726	1,84·10 ⁻¹⁵	45,089	3,99·10 ⁻¹⁵	
10	2,010	1,78·10 ⁻¹⁶	5,896	5,22·10 ⁻¹⁶	19,775	1,75·10 ⁻¹⁵	39,854	3,53·10 ⁻¹⁵	
15	0,985	8,73·10 ⁻¹⁷	4,441	3,93·10 ⁻¹⁶	16,315	1,45·10 ⁻¹⁵	26,232	2,32·10 ⁻¹⁵	
20	1,095	9,70·10 ⁻¹⁷	3,671	3,25·10 ⁻¹⁶	14,859	1,32·10 ⁻¹⁵	19,346	1,71·10 ⁻¹⁵	
30	0,701	6,21·10 ⁻¹⁷	2,612	2,31·10 ⁻¹⁶	12,160	1,08·10 ⁻¹⁵	11,424	1,01·10 ⁻¹⁵	
50	0,762	6,75·10 ⁻¹⁷	1,865	1,65·10 ⁻¹⁶	9,314	8,25·10 ⁻¹⁶	5,235	4,64·10 ⁻¹⁶	
75	0,434	3,85·10 ⁻¹⁷	1,541	1,37·10 ⁻¹⁶	6,673	5,91·10 ⁻¹⁶	2,671	2,37·10 ⁻¹⁶	
100	0,402	3,56·10 ⁻¹⁷	1,362	1,21·10 ⁻¹⁶	5,168	4,58·10 ⁻¹⁶	1,673	1,48·10 ⁻¹⁶	
150	0,247	2,19·10 ⁻¹⁷	1,261	1,12·10 ⁻¹⁶	3,093	2,74·10 ⁻¹⁶	0,912	8,08·10 ⁻¹⁷	
200	0,192	1,70·10 ⁻¹⁷	0,984	8,72·10 ⁻¹⁷	2,010	1,78·10 ⁻¹⁶	0,661	5,86·10 ⁻¹⁷	
300	0,178	1,58·10 ⁻¹⁷	0,895	7,93·10 ⁻¹⁷	1,027	9,10·10 ⁻¹⁷	0,239	2,12·10 ⁻¹⁷	
500	0,033	2,92·10 ⁻¹⁸	0,690	6,11·10 ⁻¹⁷	0,355	3,15·10 ⁻¹⁷	0,213	1,89·10 ⁻¹⁷	
750	0,080	7,09·10 ⁻¹⁸	0,542	4,80·10 ⁻¹⁷	0,113	1,00·10 ⁻¹⁷	0,003	2,66·10 ⁻¹⁹	
1000	0,068	6,02·10 ⁻¹⁸	0,410	3,63·10 ⁻¹⁷	0,128	1,13·10 ⁻¹⁷	0,109	9,66·10 ⁻¹⁸	
1500	0,072	6,38·10 ⁻¹⁸	0,358	3,17·10 ⁻¹⁷	0,101	8,95·10 ⁻¹⁸	0,152	1,35·10 ⁻¹⁷	
2000	0,030	2,66·10 ⁻¹⁸	0,246	2,18·10 ⁻¹⁷	0,021	1,86·10 ⁻¹⁸	0,070	6,20·10 ⁻¹⁸	



9.2. ábra: Visszatérő feszültségek kezdeti meredekségei különböző PVC minták esetén