



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Kotra Benedek

RÉSZKISÜLÉS MINTÁK 3D MODELLEZÉSE ÉS VIZSGÁLATA

KONZULENS

Dr. Cselkó Richárd

BUDAPEST, 2024

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	2
Összefoglaló	4
Abstract.....	5
1 Részkisülések jellemzőinek és típusainak áttekintése.....	6
1.1 Részkisülések kialakulása	6
1.1.1 Belső kisülés	7
1.1.2 Kúszó kisülés	7
1.1.3 Koronakisülés	8
2 Részkisülések mérése	10
2.1 Vezetett mérés.....	10
2.2 UHF PD detektor	11
2.3 HFCT	12
2.4 Jelfeldolgozási módszerek	12
2.4.1 Impulzusok darabszáma szerinti eloszlás	13
2.4.2 Fázisszög szerinti eloszlás	14
3 Nagyfeszültségű berendezések részkisülésvizsgálata.....	16
3.1 Részkisülések előfordulása	16
3.1.1 Belső kisülés előfordulása	16
3.1.2 Felületi kisülés előfordulása	17
3.1.3 Koronakisülés előfordulása.....	17
4 3D modellek elkészítése	18
4.1 Minták megtervezése AutoCAD-ben.....	18
4.2 Térszimulációk és számítások	19
5 Minták vizsgálata	27
5.1 Mérés előkészületei.....	27
5.2 Mérés	29
5.2.1 Mérési eredmények.....	29
5.2.2 Eredmények kiértékelése	32
6 Összegzés.....	37
Irodalomjegyzék.....	38
Ábrajegyzék.....	39

Függelék.....	41
MATLAB kódok.....	41
importAgilentBin	41
smart_meter_downsample	42
PD_measure	43
Eince	44

Összefoglaló

Az egyre növekvő villamosenergia igény folyamatos kihívásokat támaszt a villamosenergia-rendszer üzemeltetésében és korszerűsítésében. Egyre jobb és olcsóbb szigetelőkre van szükség a villamos berendezésekben és kábelhálózatokon. Ezek kifejlesztésében jelentős szerepet vállal a villamos méretezés során a szigetelésdiagnosztika. Ezen a területen megjelenő, egyre korszerűbb technológiák állnak rendelkezésünkre, mind az anyagtudományban, mind gyártástechnológiában. A 3D nyomtatás széles körű elterjedésével lehetőség nyílt eddig nehezen vagy egyáltalán nem modellezhető meghibásodásokat reprezentáló minták készítésére. Ezekkel a mintákkal új szemszögből vizsgálhatjuk meg egyes berendezéseinkben lezajló folyamatokat, többek között a nemvárt részkisülési jelenségeket.

Dolgozatom témája a nagyfeszültségű berendezésekben is kialakuló részkisülések vizsgálata. Elsődleges célom nagyfeszültségű berendezések gyártása során beépített részkisülés detektorok kalibrációjára szolgáló részkisülés minták tervezésének megalapozása.

Abstract

The growing demand for electrical energy presents ongoing challenges in operating and modernizing the electrical power system. Better and cheaper insulators are increasingly essential for electrical equipment and cable networks. Insulation diagnostics play a significant role in the development of insulators during electrical design. In this field, we have access to new technologies in both materials science and manufacturing. With the widespread adoption of 3D printing, it has become possible to create models representing defects that were previously difficult or impossible to model. These models provide a new perspective for examining processes occurring within our equipment, including partial discharge phenomena.

In this document, I investigate partial discharges that can occur in high-voltage equipment. My goal is to lay the foundation for the design of partial discharge samples for the calibration of partial discharge detectors installed in high-voltage equipments.

1 Részkisülések jellemzőinek és típusainak áttekintése

A részkisülés (részleges kisülés, részletörés, partial discharge, PD) az elektródok közt lévő szigetelőanyag szigetelőképességének olyan helyi letörése, amely nem hidalja át a teljes elektródaközt [1]. A részkisülés előfordulhat az elektródán, vagy attól távol is. Jellemzően gázokban és folyadékokban vagy szilárd szigetelő zárványaiban jönnek létre.

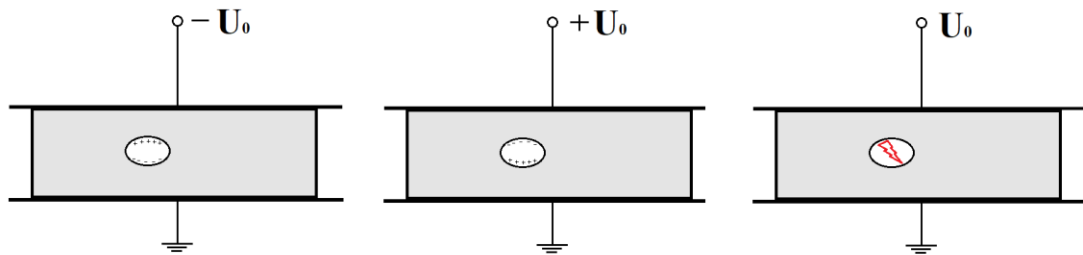
Típusai:

- Koronakisülés: az elektródán jön létre, nagy inhomogén elektromos tér jelenlétének, jellemzően kis görbületi sugarú részeknél, sarkoknál, csúcsoknál.
- Felületi- vagy kúszókisülés: többnyire szilárd és légnemű szigetelőanyag határán alakul ki.
- Belső- vagy üregkisülés: szilárd szigetelőanyag zárványában, vagy a szilárd szigetelő és az elektróda közötti légzárványban alakul ki.

1.1 Részkisülések kialakulása

A különböző típusú részkisülések különböző módon alakulnak ki, ezért érdemes őket külön tárgyalni. Általánosan kijelenthető, hogy létrejöttek önmagában nem, vagy csak ritkán okoz meghibásodást, viszont tartós fennállásuk esetén a szigetelőanyag degradálódik, ami gyorsítja az öregedést, így a szigetelőanyag képes elveszíti a kedvező villamos tulajdonságait. Első sorban a szilárd szigetelőkben, illetve a nem regenerálódókban okoznak nagy problémát, mert ezekben a hosszan tartó jelenlétük villamos ív kialakulásához vezethet. Fontos megjegyezni, hogy a kisülési jelenségek a gerjesztő feszültség polaritásától erősen függenek.

1.1.1 Belső kisülés



1. ábra

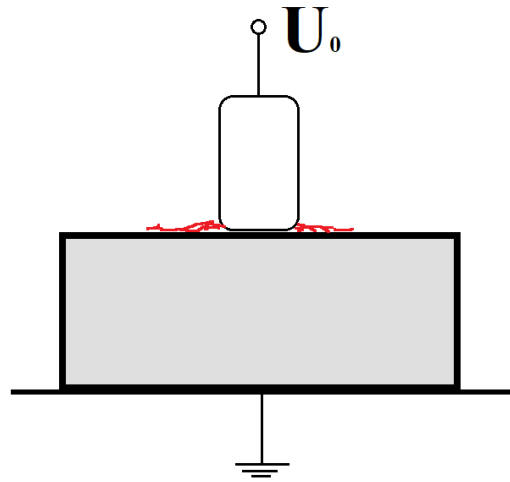
Belső kisülés kialakulása

Belső kisülésről akkor beszélünk, amikor a szilárd szigetelőanyag belsejében zárvány alakul ki, vagy a szigetelőanyag és az elektród közti rést valamilyen más szigetelőanyag tölti ki, általában levegő. Mivel a zárványban lévő szigetelő többnyire kisebb villamos szilárdsággal bír, ezért ott hamarabb megtörténik a villamos szilárdság letörése. Ez a helyi térerősség megszűnés még nem vezet közvetlenül a szilárd szigetelőanyag átütéséhez, de a zárványban akár ív is kialakulhat, ami roncsolja a szilárd szigetelőanyagot. A belső kisülés a feszültségnek a nullátmeneténél alakul ki, mivel a feszültség polaritás váltásakor az üreg belső falán felhalmozódott töltések hirtelen megindulnak a külső gerjesztés hatására. Gyakori meghibásodási ok nagyfeszültségű kábelek esetében, mikor a kábelszigetelésben akár már a gyártás során keletkezett zárványban alakul ki az üregkisülés. [1]

1.1.2 Kúszó kisülés

Kúszó kisülésről más néven felületi kisülésről akkor beszélünk, ha a részkisülés két szigetelőanyag határfelületén keletkezik. Többnyire szilárd és gáz vagy szilárd és folyékony halmazállapotú anyagok találkozásánál alakul ki. Kialakulása az úgynevezett hármaspont-hoz köthető, ahol elektród és két különböző szigetelőanyag találkozik. Mivel az elektród és a szilárd szigetelőanyag közt nem tökéletes a kapcsolat, ezért az ott lévő légrésekben letörik a villamos szilárdság és megindul a felületi kisülés folyamata. Az elektródnál megjelenő kisülések kellően nagy teret keltenek ahhoz, hogy meginduljon a szilárd szigetelő felszínén egy kisülés. Ha a szilárd szigetelő kellően nagy, vagyis az ellenelektród elég távol van, akkor a kisülés nem fut végig a teljes szigetelőn, nem történik átívelés. A felületi kisülés erős összefüggésben van a szilárd szigetelőanyag szennyezettségével, minél több a vezetésben részt venni képes anyag a szigetelő

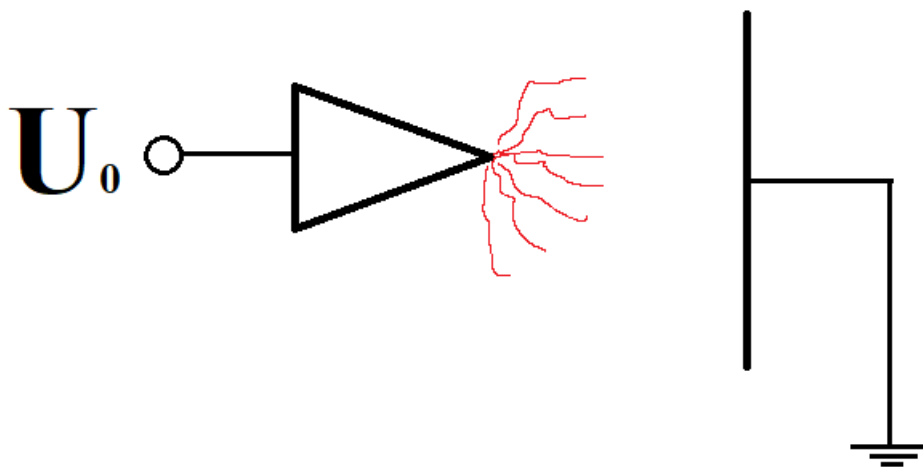
felszínén, mint például víz, por, lerakódott idegen anyagok (folyadékokban), annál kisebb elektromos tér kell a kialakulásához. Szinuszos gerjesztés esetén a feszültség nullátmenetében indul meg a kisülési folyamat.



2. ábra
Felületi kisülés kialakulása

1.1.3 Koronakisülés

A nagyfeszültségű technikában, főleg a nagyfeszültségű távvezetékek esetén komoly problémát okoz a koronakisülés. Kialakulását nagyban befolyásolja az elektróda alakja és az elektródok távolsága. Csúcsok, sarkok, kis görbületi sugarú elrendezések a legideálisabbak a kialakulására. Ezeken a helyeken az elektromos térerősség nagy és erősen inhomogén.



3. ábra
Koronakisülés kialakulása

Pozitív töltésű elektróda esetén, a levegőben lévő töltött részecskék mozgásba jönnek. Elektronok indulnak meg az elektród felé, míg a pozitívan töltött részecskék távolodnak. Amennyiben a tér kellően nagy és a gyorsuló elektronok képesek lesznek ütközési ionizációt létrehozni, akkor kialakulnak az úgynevezett elektronlavinák. Ha az elektródba becsapódó elektronok energiája meghaladja az elektródot alkotó atomok kilépési munkáját, akkor képesek az elektródból is töltéseket kiszakítani. A folyamat következményeképpen kialakul egy pozitív töltésfelhő, ami hatására a közte és a pozitív elektród között a villamos tér lecsökken. Ekkor a folyamat megáll, majd a töltésfelhő eloszlása után újraindul.

Negatív töltésű elektróda esetén az elektronlavinák az elektródtól távolodnak, egyre kisebb térerősségű részre jutva. Itt megszűnik maga a lavina, de az elektronok még tovább mozognak, egyre lassulnak. Ha kellően lelassultak, akkor elektronnegatív gázok képesek őket megkötni, így negatív ionokká válnak. Kialakul egy negatív töltésfelhő az elektródtól távol, hozzá közel meg a visszamaradt pozitív ionok által egy pozitív töltésfelhő keletkezik. A két térrész közt megnövekszik a térerősség, újabb lavinák keletkezhetnek és tovább növelik a negatív töltésteret. Közben a pozitív töltések az elektródhoz közelednek, arra kilépnek és lassan megszűnik a pozitív töltésfelhő. Ekkor az elektród és a negatív tértöltés közt az elektromos tér lecsökken, a folyamat megáll. A negatív ionok eloszlása után kezdődik előről a kisülési folyamat [2].

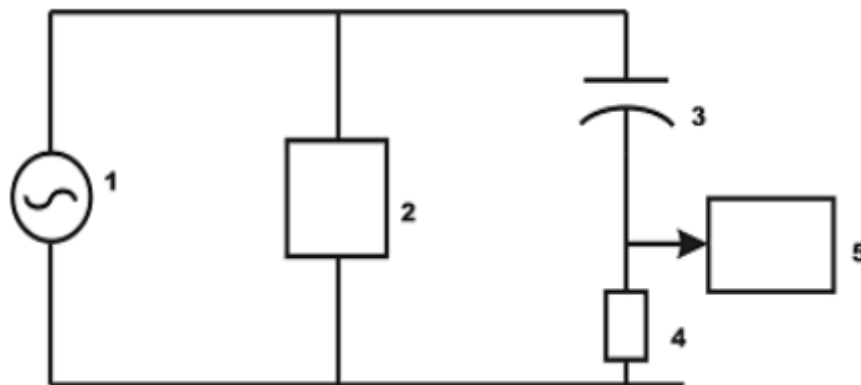
A koronakisülés feszültség csúcsnál, vagy annak közelében alakul ki, mivel ekkor kellően nagy a kisülési folyamathoz szükséges elektromos tér. Pozitív csúcsnál pozitív koronakisülés, negatív csúcsnál negatív koronakisülés keletkezik.

2 Részkisülések mérése

Továbbá széles körben alkalmazzák a nagyfrekvenciás áramváltókat (HFCT) is az áramimpulzusok detektálására. Meg kell említeni az akusztikai, látható/UV fénytartománybeli és elektromágneses sugárzáson alapuló detektálási módokat is [5]. Utóbbiak alkalmazása on-line (a hálózaton) mérések során előnyösek. [7]

2.1 Vezetett mérés

A részkisülések mérésének több lehetséges módja van. A legtöbb a kisülések töltésmennyiségével arányos feszültség/áram impulzusokat méri. Egy ilyen mérési eljárás a konvencionális részkisülés detektorral történik, amit a 4. ábra mutat be. [2][5]



4. ábra

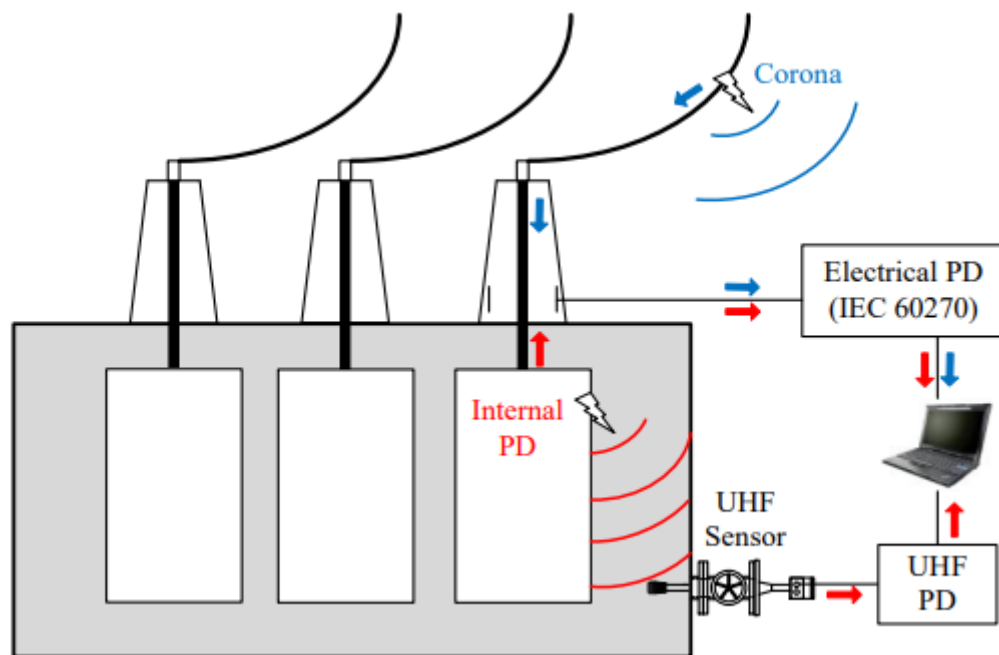
Konvencionális részkisülés detektor

*G.C. Stone: Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment
Insulation Condition Assessment*

1. Nagyfeszültségű feszültségforrás
2. Vizsgálati tárgy
3. Csatolókonkondenzátor
4. Mérőimpedancia
5. Mérőműszer

2.2 UHF PD detektor

A villamosenergia hálózaton üzemelő berendezések állapotának ellenőrzésére nagyon ritkán adódik lehetőség laboratóriumi vizsgálatok végzésével. Az ilyen jellegű vizsgálatok több napot, akár heteket, hónapokat is igénybe vehetnek, ami alatt a berendezést ki kell emelni a helyéről és el kell szállítani laboratóriumba. Ez sok üzemóra kiesést okozna, amennyiben a berendezést nem tudják kiváltani egy másikkal, a vizsgálatok idejére.



5. ábra

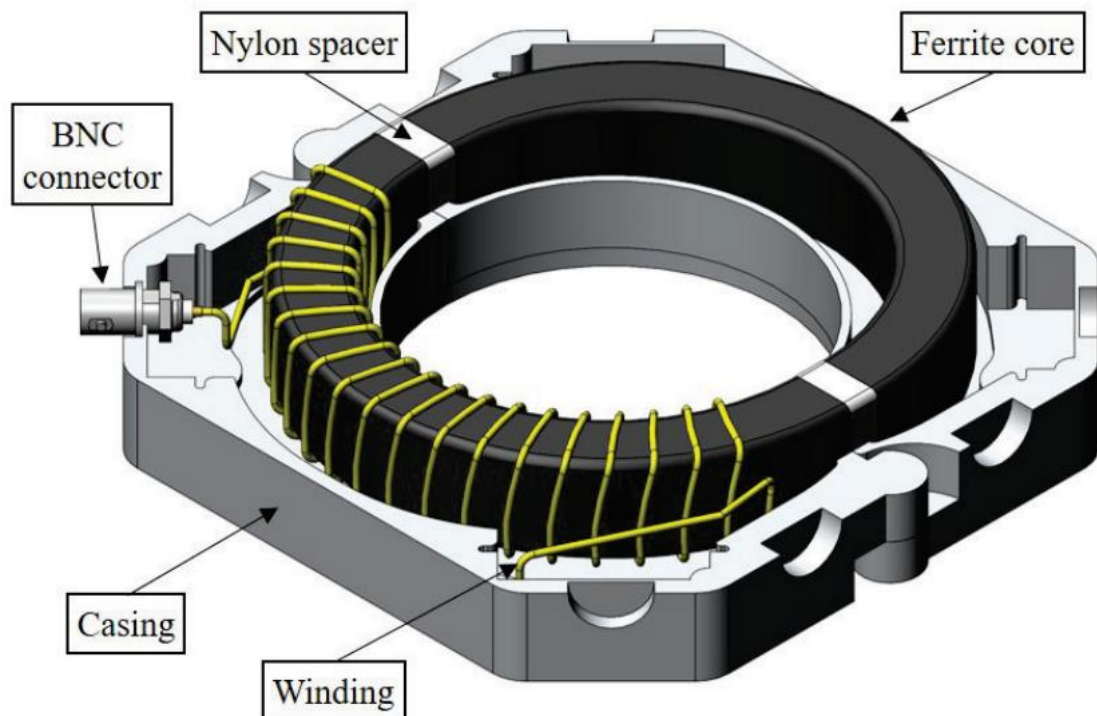
UHF PD mérési elrendezés transzformátor esetén

S. Tenbohlen, M. Siegel, M. Beltle und M. Reuter, „Suitability of Ultra High Frequency Partial Discharge Measurement for Quality Assurance and Testing of Power Transformers,“ in CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM, Zürich, 2013.

Erre ad megoldást az UHF PD detektorok alkalmazása. Kialakításuknak köszönhetően könnyen beépíthető mind tokozott kapcsolókészülékekbe, mind transzformátorokba. Régebbi kialakítású berendezésekre utólag is felszerelhetőek, bár ekkor mérsékelten hatékonyak. [11]

2.3 HFCT

A nagyfrekvenciás áramváltó (High Frequency Current Transformer) egy bontható vasmaggal rendelkező transzformátor, ami áramimpulzusokat már oszcilloszkóppal is mérhető jellé alakítja. Kialakítása miatt galvanikusan el van választva a mért jel a forrástól. Elsősorban kábelek részkiülésvizsgálatához alkalmazzák on-line mérések során, de laboratóriumi mérések végzésére is kiválóan alkalmasak nagy sáv szélességük és magas érzékenységük miatt. [10][12]



6. ábra
HFCT-k felépítése.

Zachariades, C., Shuttleworth, R., Giussani, R., & MacKinlay, R. (2016). Optimization of a High Frequency Current Transformer sensor for Partial Discharge Detection using Finite Element Analysis. *IEEE Sensors Journal*, 16(20), 7526 - 7533.

2.4 Jelfeldolgozási módszerek

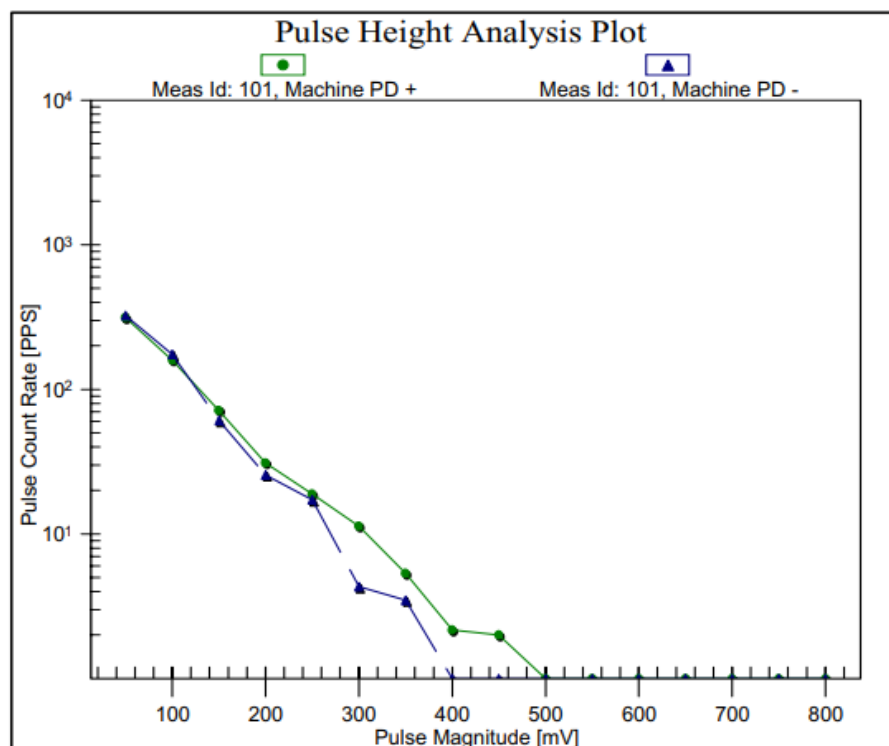
Napjainkban a hagyományos analóg módszerek kezdenek kiszorulni és a digitális jelfeldolgozás kerül előtérbe. A digitális oszcilloszkópok elterjedésével a részkiülések vizsgálata egyszerűbbé vált. Az analóg oszcilloszkópokon nagyon nehezen lehetett csak kimérni egy-egy impulzust a folyamatos mintavételezés miatt. A digitális

oszilloszkópok képesek ezeket az impulzusokat a képernyőjükre rögzíteni, így könnyebben megmérni azok amplitúdóit és a lecsengésüket. Továbbá lehetőséget adnak adatok kimentésére is, amiket további módszerekkel, szoftverekkel fel lehet dolgozni.

2.4.1 Impulzusok darabszáma szerinti eloszlás

Az egyik legegyszerűbb feldolgozási mód, ahol az impulzusok amplitúdója szerint ábrázoljuk az időegység alatt mért impulzusok darabszámát. Megfelelő időablak mintavételezésekor a kapott impulzusokat amplitúdó méret szerint rendezni kell és az azonos mérettartományba eső impulzusokat össze kell számolni. Egy ilyen eljárásnak a végeredményét a 7. ábra mutatja.

Ezt a jelfeldolgozást akkor érdemes elvégezni, hogyha kizárólag a részkiülés roncsoló hatására vagyunk kíváncsiak, mivel magáról a részkiülés fajtájáról nem ad információt.



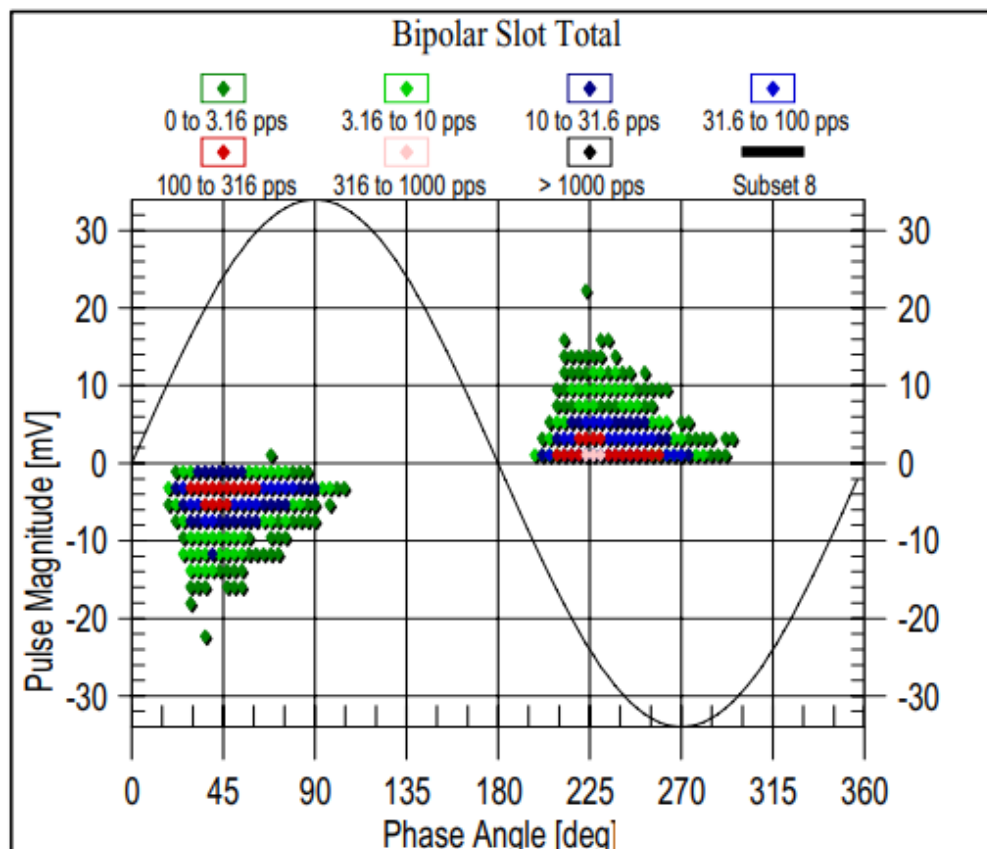
7. ábra

Impulzusok darabszámának eloszlása

*G.C. Stone: Partial Discharge Diagnostics and Electrical
Equipment Insulation Condition Assessment*

2.4.2 Fázisszög szerinti eloszlás

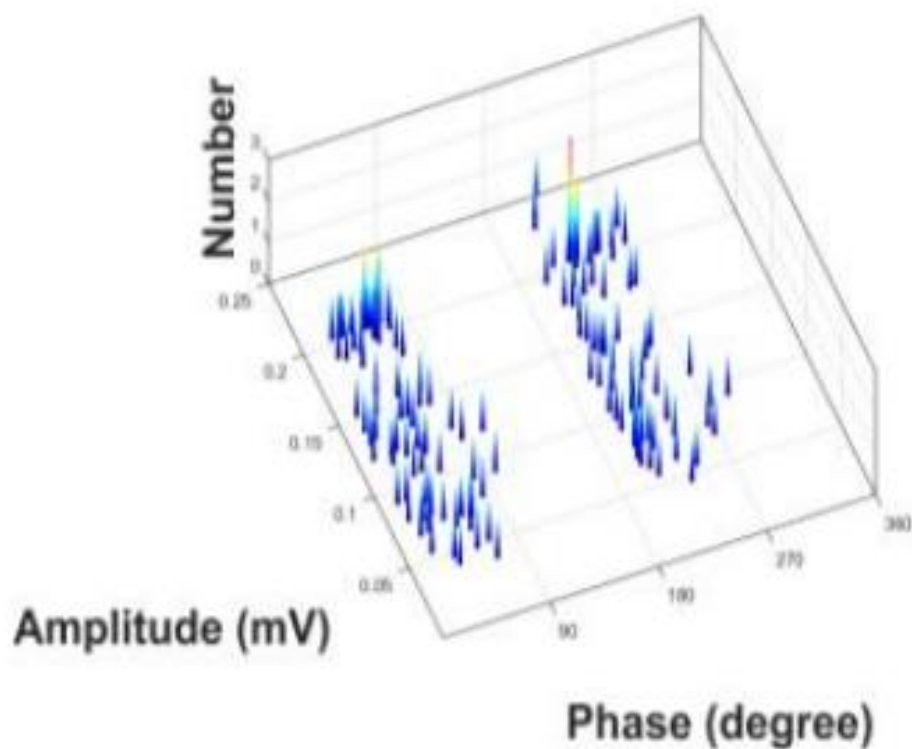
A fázisszög szerinti eloszlás (Phase Resolved Partial Discharge - PRPD) az impulzusok amplitúdóját ábrázolja a fázisszög függvényében. Ennél az eljárásnál a mintavételezett tartomány minden egyes azonos fázishelyzethez tartozó impulzusát egy közös diagrammon ábrázoljuk és esetleg a darabszámukat is meg lehet számolni (ez lényegében a 2.4.1 fejezetben ismertetett módon történhet). Ekkor egy a 8. ábrán látható eredményt kapunk.



8. ábra

Fázisszög szerinti eloszlás

*G.C. Stone: Partial Discharge Diagnostics and Electrical
Equipment Insulation Condition Assessment*



9. ábra

Fázisszög és amplitúdó szerinti darabszám

N H Nik Ali , P Rapisarda , P L Lewin, Separation of Multiple Partial Discharge Sources Within a High Voltage Transformer Winding using Time Frequency Sparsity Roughness Mapping

A jobb átláthatóság kedvéért lehetséges 3 dimenziós grafikonon ábrázolni. Erre egy példát a 9. ábra mutat. Ennek a jelfeldolgozási módnak köszönhetően már a részkiülés jellegéről, típusáról is lehet megállapításokat tenni.

3 Nagyfeszültségű berendezések részkiülésvizsgálata

A nagyfeszültségű berendezéseket több évtizedes üzemidőre tervezik. Üzemeltetésük alatt a különböző karbantartási és néha üzemszerű működési szüneteket leszámítva folyamatosan feszültség alatt vannak. Több évnyi folyamatos használat során minden apró meghibásodás komoly problémát okozhat. A hálózat üzemeltetője törekszik minél stabilabb, biztosabb hálózatot fenntartani, hogy a végfogyasztók minél kevesebb feszültségkimaradást tapasztaljanak. Ennek egyik eleme a nagyfeszültségű transzformátorok és kapcsolóberendezések hosszútávon történő működésének biztosítása. Ezt már a tervezés során figyelembe kell venni, hogy a lehető legkevesebb meghibásodás történhessen meg.

3.1 Részkiülések előfordulása

A nagyfeszültségű berendezésekben sokféle, különböző alakú, eltérő potenciálú elektród található meg. Ezeket el kell egymástól szigetelni, különféle szempontoknak megfelelően. Ilyen szempont lehet például a mechanikai tartás, vagy a szigetelő töltőn be hűtési funkciót is. Minden halmazállapotú szigetelő anyag megtalálható akár egymás mellett is ezekben a berendezésekben, így bármilyen részkiülés kialakulhat.

3.1.1 Belső kiülés előfordulása

Talán a leggyakoribb részkiülés fajta mind transzformátorokban, mind kapcsoló készülékekben, mivel sok helyen előfordulhat. Elég csak egy tekercselés menetszigetelésére gondolni, ahol nagyon sűrűn vannak a menetek, kis távolságra és ezeket mind el kell szigetelni egymástól. A kis távolságok miatt gyártás során könnyen ki tud alakulni légbuborék két elszigetelt menet közt, ami ideális a belső kiülés létrejöttének. Ebből könnyedén ki tud alakulni átütés, és mivel folyamatos a transzformátor működése, tartós ív is, ami kezdetben még csak két szomszédos menet közt van, de hamar tovább terjedhet további menetekre. Az ív magas hőmérséklete miatt egyszerűen átégeti a szigetelést, amik általában nagyon gyúlékony anyagokból készülnek, mint például olaj, papír vagy különböző műanyagok. Az ilyen jellegű meghibásodások megelőzésére jó megoldást ad a berendezésbe épített részkiüléseket detektáló szerkezetek.

3.1.2 Felületi kisülés előfordulása

A belső kisülés után a másik jelentősebb részkisülés amit megfigyelhetünk a nagyfeszültségű berendezésekben, az a felületi kisülés. Sok szilárd szigetelőt találhatunk a bennük, amik statikai szerepet töltenek be, például a vasmagot és a transzformátor házát elválasztó szigetelők, amiket olaj vesz körébe. Itt meg is figyelhetünk egy hármaspontot az olaj, a szilárd szigetelő és a vasmag közt. Hogy elkerüljük a felületi kisüléseket az ilyen hármaspontokat kell minimálisra csökkenteni, ahol pedig ez nem lehetséges, ott megfelelő méretezéseket kell végezni. Az így méretezett alkatrészeket laboratóriumi körülmények közt ellenőrizni lehet.

3.1.3 Koronakisülés előfordulása

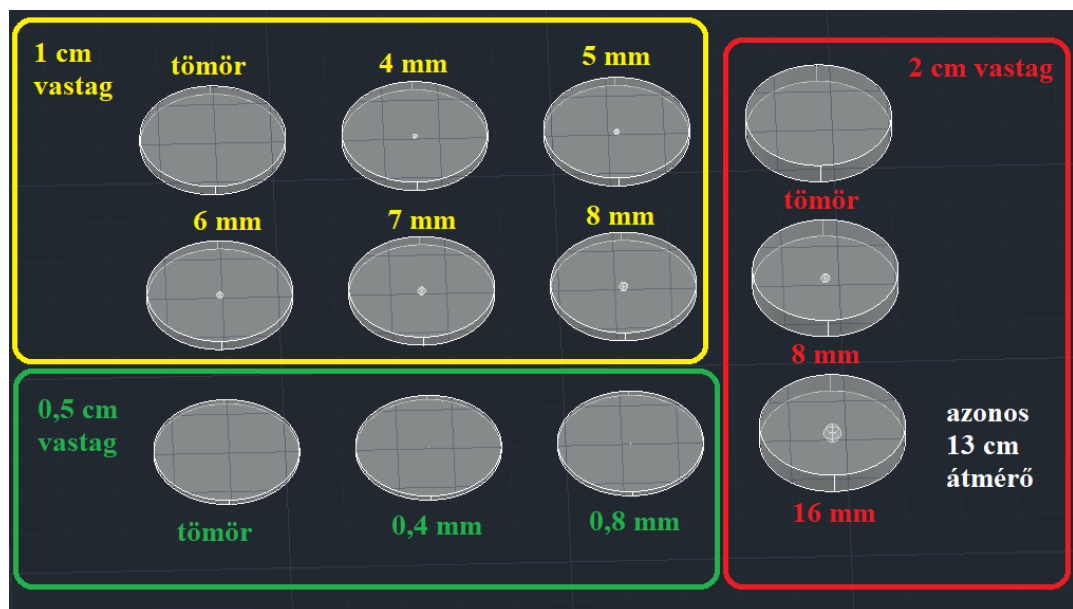
Koronakisüléssel berendezésen belül ritkán kell számolni, mivel általában olajjal vagy gázzal vannak töltve és ott nem alakulhat ki koronakisülés. Persze előfordulhat olyan, hogy valamilyen gáz szabadul fel nagyobb mennyiségben például transzformátoron belül és ha az egy elektród körül halmozódik fel akkor abban kialakulhat koronakisülés. Mégis jelentős szempont berendezések tervezésekor a korona jelenség, mivel a feszültség kivezetéseken (vagy a bevezetéseken is) könnyedén ki tud alakulni. Ez ellen a kivezetés nagy görbületi sugarú fémmel (gömbbel, félgömbbel) való burkolása ad megoldást. [4]

4 3D modellek elkészítése

3D modellezéssel gyorsan és hatékonyan lehet olyan mintákat készíteni, melyek segítségével meghatározott részkiülési jelenségeket lehet létrehozni. Az elkészült tervek alapján szimulációkkal is meg lehet győződni milyen jelenségeket várhatunk az adott elrendezésre.

4.1 Minták megtervezése AutoCAD-ben

Az AutoCAD tökéletes környezetet biztosít az ilyen jellegű 3D-s tervek elkészítésében. Eszköztárában megtalálható alakzatok gyors és egyszerű elkészítését teszi lehetővé a mintáknak. A minták felépítése egy 13 cm átmérőjű körből indultak ki. Ennek a körnek adtam magasságot, ami vagy 2,5 mm, vagy 5 mm volt. Három különböző vastagságban készítettem korongokat, hogy vizsgálható legyen a korong vastagsága okozta különbség. Miután elkészültek ezek a korongok, a felső körlapjuk közepébe egy megfelelő méretű gömböt szerkesztettem, majd ezt a gömböt kivontam a korongból. Végül lépésként csak tükröztem a korongokat a felső körlapjukra.



10. ábra

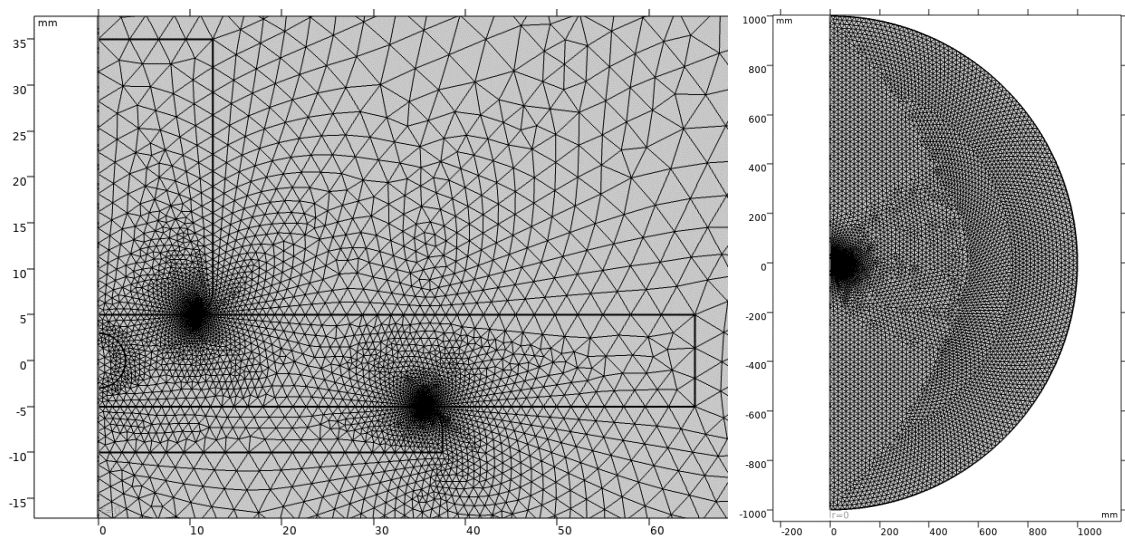
A megtervezett részkiülésminták

Az AutoCAD lehetőséget biztosít 3D nyomtatáshoz szükséges fájlok készítéséhez is. A nyomtatáskor egy QIDI i-mate S 3D nyomtatót használtam, a gyártó saját slicerével. Ebben a programban lehet beállítani a nyomtatás paramétereit, melyekkel nem tértem el

a filament gyártója által javasolt értékektől. A nyomtatás 100%-os kitöltéssel készült, így egyéb lényeges méretű üregek nincsenek a korongokban. A filament anyaga PET-G, mely kedvező villamos és egyéb tulajdonságokkal rendelkezik, többek közt áttetsző, így akár UV vagy látható fényes megfigyelésekre is alkalmasak lehetnek a belőle elkészült minták.

4.2 Térszimulációk és számítások

Az elkészült 3D-s tervek alapján végelem szimulációkat végeztem az elrendezésekre. A szimulációk a COMSOL multiphysics 6.0-ás verziójában készültek. A szimulációkkal a kialakuló térerősség nagyságokra voltam kíváncsi eltérő feszültség szinteken.



11. ábra

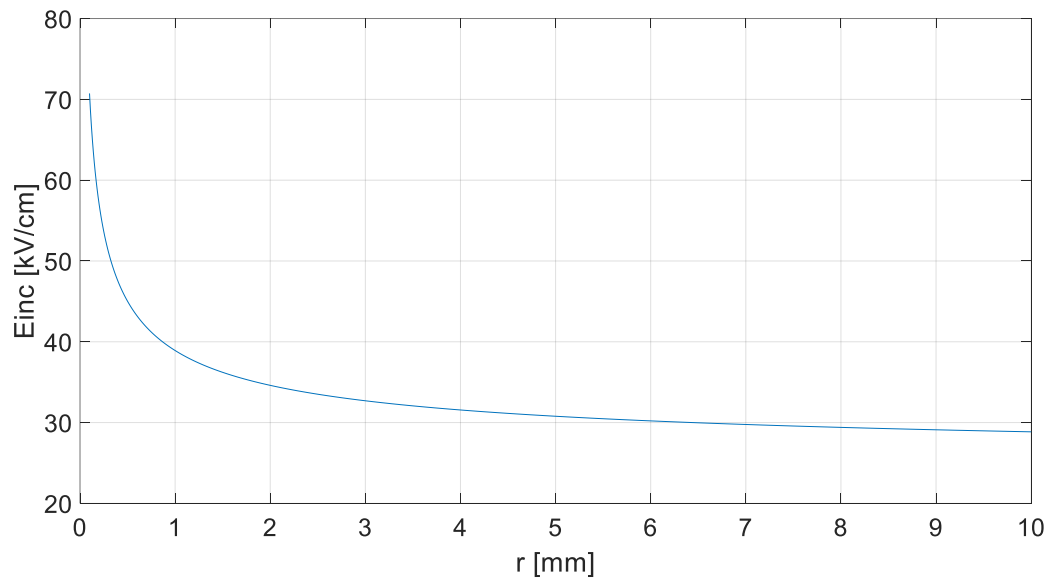
6 mm átmérőjű üreg, 1cm vastag korong hálója

A COMSOL lehetőséget biztosít előre megtervezett geometriák importálására is, de mivel ebben az esetben egy tengelyre szimmetrikus volt az elrendezés, így gyorsabb és egyszerűbb volt 2D-ben megrajzolni a mérési elrendezést. A megrajzolt geometriát anyagi jellemzőkkel is el kell látni. A program gyári könyvtárjaiban rengeteg előre definiált anyagból tudunk válogatni, így a levegő, réz és PET is köztük volt. Utóbbi esetében meg kellett adni a permittivitás értékét. PETG esetén viszonylag széles tartományban mozog az értéke, így a [8] alapján 3-nak választottam meg.

Ahogy arra számítani lehetett és a szimulációk is alátámasztották, a potenciálon lévő elektród széleinél a lekerekítés ellenére is jelentős a térerősség nagysága, így a mérések során felületi kisülésekre is számítani lehet.

Ahhoz, hogy elkülöníthessük az üregkisülést a felületi kisüléstől, meg kell határozni azt a kialakuló térerősséget az üregben, aminek a hatására megindulnak a részkisülések az üregben belül. Erre különböző módszerek vannak, ezek közül egy az alábbi képlettel írható le [3]:

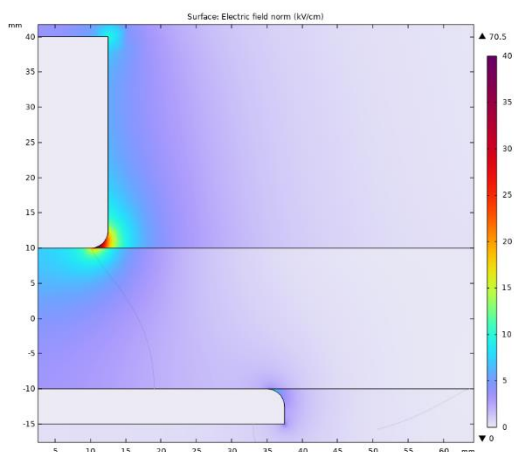
$$E_{inc} = 24,2 \cdot 10^5 \cdot \left(1 + \frac{8,6}{\sqrt{2 \cdot r \cdot 10^5}}\right),$$



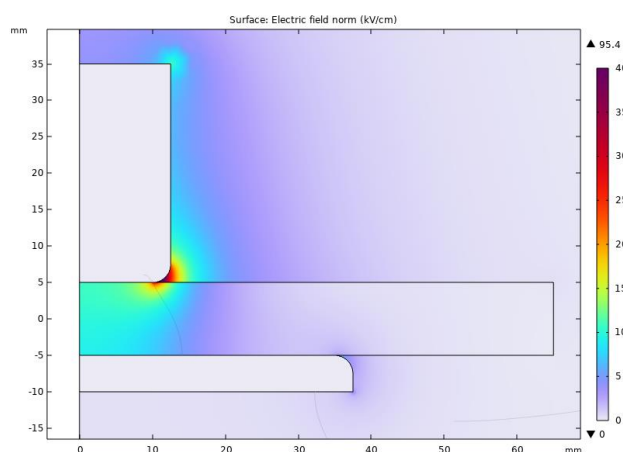
12. ábra

Adott üregsugárhoz tartozó minimális térerősség a részkisülés kialakulásához.

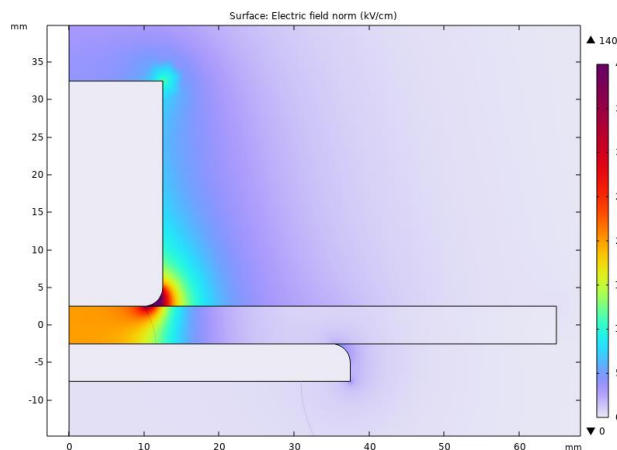
ahol $r [m]$ az üreg sugara. $E_{inc} \left[\frac{V}{m} \right]$ -ben adja meg a részkisülés megindulásához szükséges elektromos térerősség nagyságát normál légköri nyomáson.



2 cm vastag korong 10 kV-on



1 cm vastag korong 10 kV-on



0,5 cm vastag korong 10 kV-on

13. ábra

Teli minták összehasonlítása

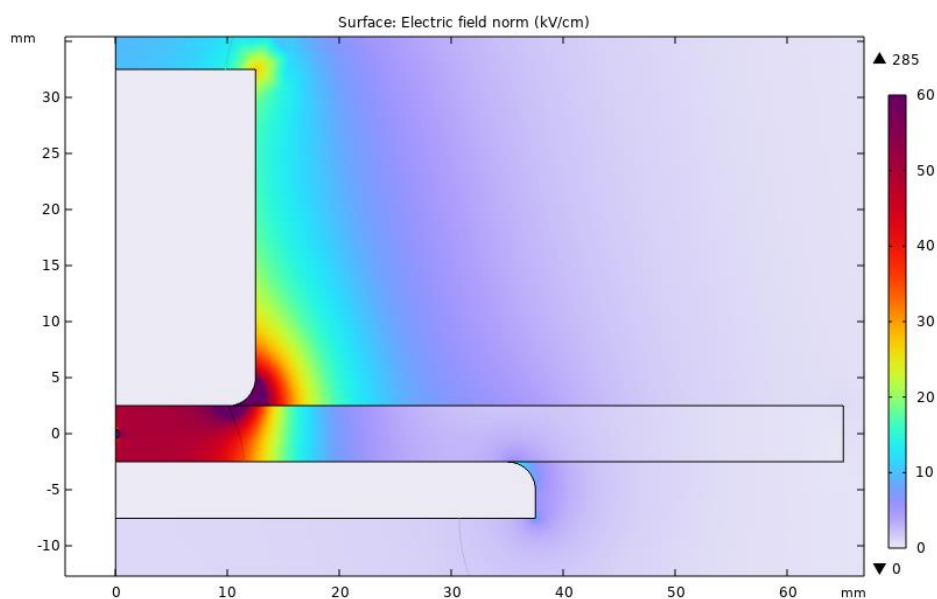
A 4.1 fejezetben megtervezett, üreg nélküli minták elektromos térerősség szimulációin jól látszik, hogy a korongok vastagsága miként befolyásolja a szigetelőben kialakuló térerősség nagyságát. Az előzőekben megismert képlettel összevetve a korong vastagságának módosításával lehet elérni, hogy ki tudjon alakulni az a térerősség az üregekben, ami szükséges a részkisülések megindulásához.

A szimulációk során megfigyelhető, hogy a hármaspontnál sokkal nagyobb térerősségek is kialakulnak, mint az üregekben, így a felületi kisülések jelentősen hamarabb megjelennek, mint az üregkisülések.

1. táblázat

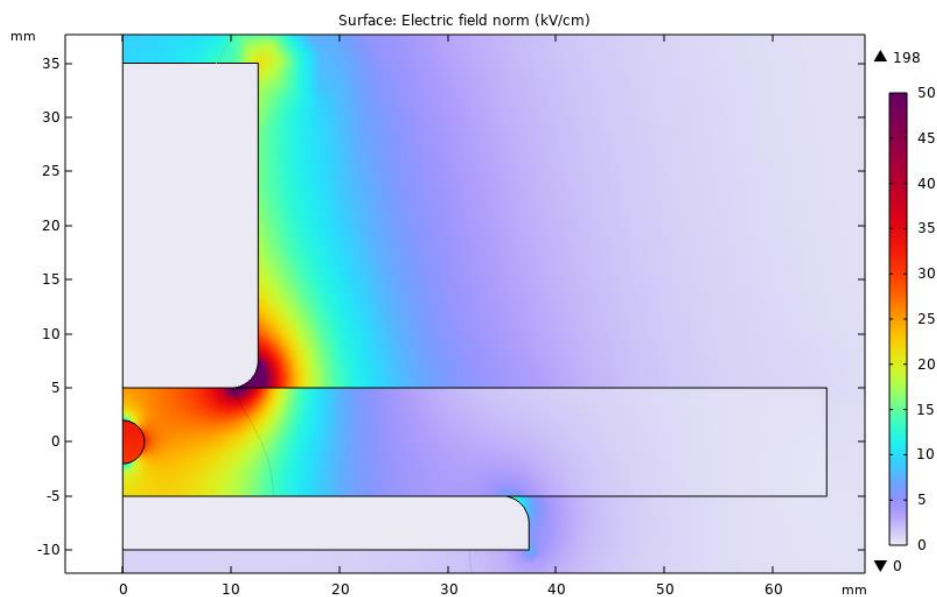
Tervezett üreg átmérő [mm]	0,4	0,8	4	5	6	7	8	16
Üregkisüléshez szükséges télerősség $\left[\frac{kV}{cm}\right]$	57,106	47,468	34,606	33,507	32,696	32,066	31,558	29,403

Ahhoz, hogy ne kelljen nagyon nagy feszültséget kapcsolni a mintára (itt felső korlátot szab a mérési elrendezésben használt csatolókondenzátorra kapcsolható 25 kV-os maxim feszültség, illetve a koronakisülések kialakulásának minimalizálása), a kisebb üregek vizsgálata csak a 0,5 cm-es korongvastagság mellett lehetséges, míg az 1 cm-t meghaladó üregek kizárólag csak nagyobb korongvastagság mellett vizsgálhatóak. Ezek alapján készültek el a minták (10. ábra).



14. ábra

0,5 cm vastag minta 0,8 mm-es üregátmérővel 25 kV-on



15. ábra

1 cm vastag minta 4 mm-es üregátmérővel 25 kV-on

Minden korongról készült végelem szimuláció, a kritikus térerősség kialakulásához szükséges feszültség szint meghatározásához. Mivel a részkisülések megindulása statisztikai jelenség, ezért nehéz pontosan meghatározni milyen feszültség értéken fog bekövetkezni. Így egy becslést elegendő meghatározni, hogy milyen feszültség érték körül alakul ki a kritikus térerősség az üregben.

2. táblázat

0,5 cm vastag korongok kritikus térerősségéhez szükséges feszültség

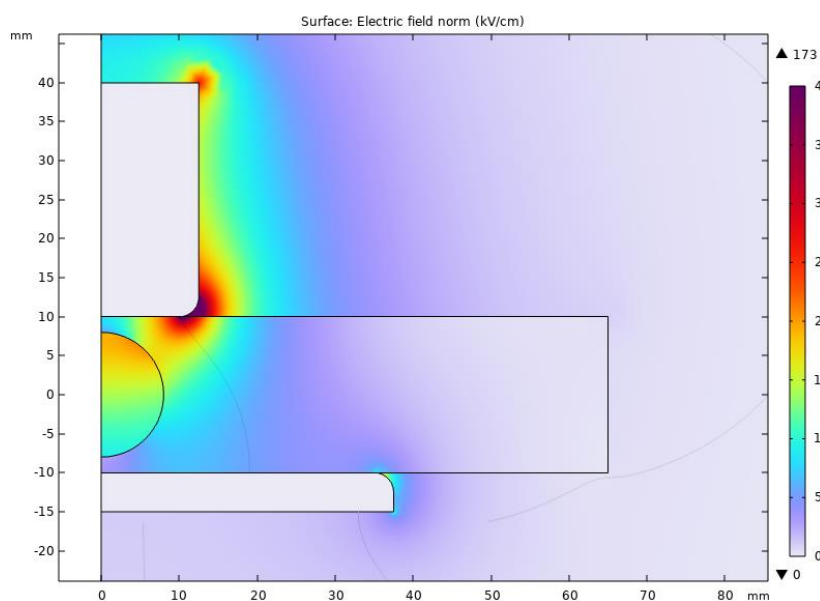
Üreg átmérő [mm]	0,4	0,8
Feszültség [kV]	22,3	18,5
Üregben kialakuló térerősség $\left[\frac{kV}{cm}\right]$	57.335	47,535

3. táblázat

1 cm vastag korongok kritikus térerősségéhez szükséges feszültség

Üreg átmérő [mm]	4	5	6	7	8
Feszültség [kV]	25	25	25	25	25
Üregben kialakuló térerősség $\left[\frac{kV}{cm}\right]$	31,744	31,381	30,950	30,303	29,350

A 3. táblázatban látható, hogy 25 kV-on is csak megközelíti a 1. táblázat által előírt értékeket. A valóságban ennek ellenére lehet számítani az üregkisülések megjelenésére, a részkisülések kialakulásának viszonylag nagy szórása miatt. Ezen számítások alapján a 2 cm vastag korongok esetén a maximális feszültség sem elég a kritikus térerősség megközelítésére sem, így ezekkel a mintákkal nem foglalkozok a későbbiekben.



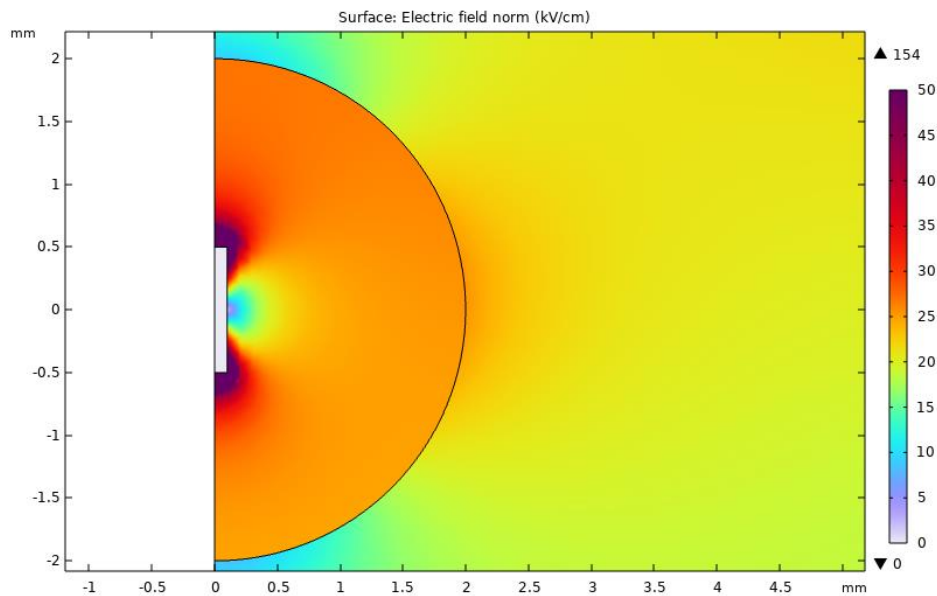
16. ábra

2 cm vastag minta 16 mm-es üregátmérővel 25 kV-on

Érdekes megvizsgálni, hogyan változhat meg az üregben kialakuló elektromos térerősség, ha az üregben nem csupán levegő van. A 4 mm átmérőjű üreggel rendelkező mintát vettem alapul. Az üreg közepébe (ez nem igazán felel meg a valóságnak) egy téglalapot szerkesztettem, aminek anyagát vasra állítottam. Ezzel szerettem volna

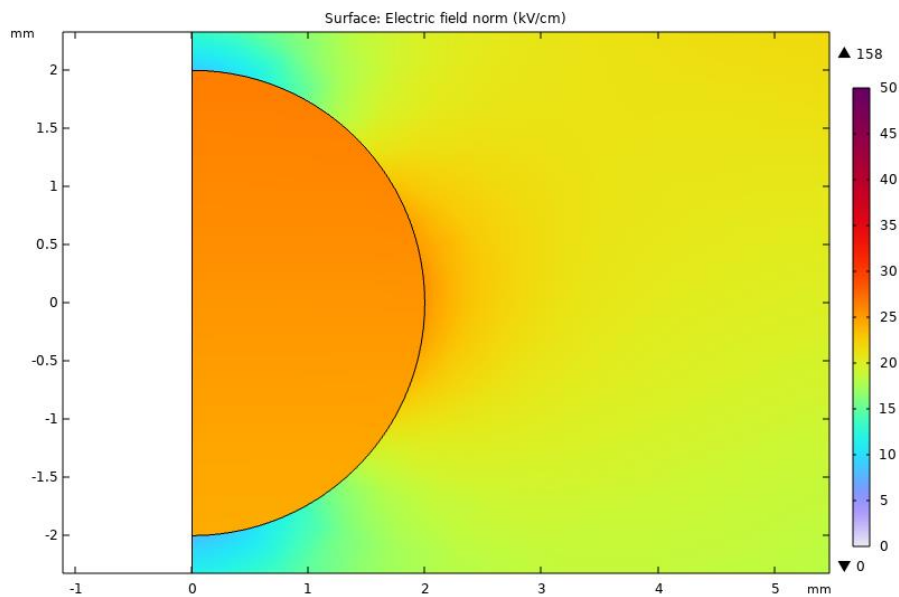
modellezni egy olyan esetet, hogy egy szigetelő legyártása során valami oknál fogva, nem csak egy üreg alakul ki benne, hanem még fémszennyezés is kerül bele.

Maga a vasdarab egy 1 mm magas 0,2 mm széles téglalap, amit lebegő potenciálúra állítottam. Mivel az üreg egy részét szilárd anyag tölti ki, ezért az üreg mérete lecsökken, így megnő a kritikus térerősség nagysága. A fémszennyezésnek köszönhetően viszont a fém körül megnő a térerősség és az üregben egy viszonylag nagy vezető réteget is biztosít, ezekkel rontva a szigetelő villamos szilárdságát.



17. ábra

4 mm-es üreg fémszennyezéssel 20 kV-on



18. ábra

4 mm-es üreg fémszennyezés nélkül 20 kV-on

4. táblázat

X Y koordináták	(0 ; 0,5)	(0,1 ; 0,5)	(0,1 ; 0)	(0,1 ; -0,5)	(0 ; -0,5)	(0 ; -2)	(0 ; 2)
Fémmel $\left[\frac{kV}{cm}\right]$	98.785	142.92	1.7529	133.10	96.159	24.693	26.949
Fém nélkül $\left[\frac{kV}{cm}\right]$	25.667	25.675	25.375	25.073	25.073	24.259	26.514

Megfigyelhető, hogy a fém hatására jelentősen torzul az erőter az üregben belül. A rövid oldalak mentén durván megnégyszereződött, a sarkoknál akár hatszorosára is növekedhetett a térerősség nagysága, míg a hosszú oldal közepén szinte nullára csökkent az. Az üreg falánál lényeges változás nem történt a fém hatására.

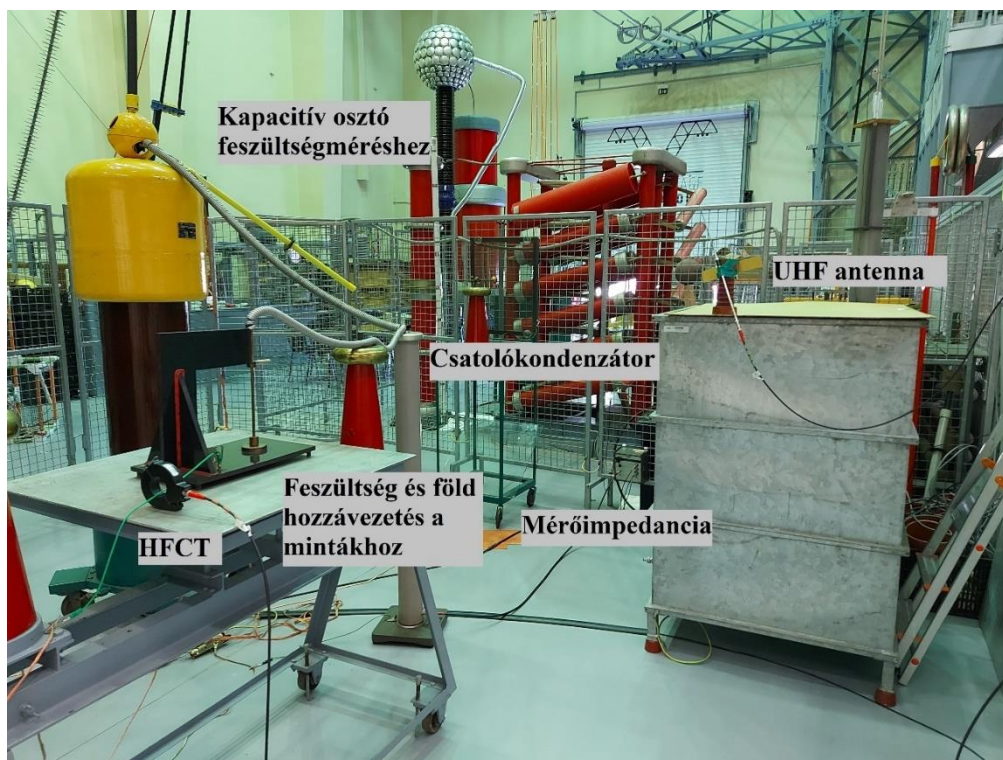
A gyakorlati megvalósítása a fémrel szennyezett mintának úgy történt, hogy a nyomtatás 50%-nál meg lett állítva. Ekkor az üregbe egy vasforgács darabot helyeztem el, majd folytatódott a nyomtatás. A vasforgács egy jóval összetettebb geometria, mint a modellben alkalmazott téglalap, így elég kiszámíthatatlan erőtertorzulást okoz a gyakorlatban.

5 Minták vizsgálata

Az elkészített részkisülés mintákat a Nagyfeszültségű Laboratóriumban vizsgáltam. A mérés elvégzéséhez a laboratórium 250 kV-os próbatranszformátora biztosította a feszültséget.

5.1 Mérés előkészületei

Első lépésként a mérőteret rendeztem be. A mérési elrendezés az alábbi képen (19. ábra) látható. Három módon végzem a részkisülések mérését. Az első a vezetett mérés, erre egy mérőkondenzátort és egy ehhez kapcsolt részkisülés mérő műszert használok. A második módszer a nagyfrekvenciás áramváltó használata, harmadikként pedig egy antenna segítségével detektálom a részkisülések által kisugárzott elektromágneses hullámokat. A kapott jeleket oszcilloszkóppal rögzítem, melynek utolsó szabad csatornáján a transzformátor feszültségét mérem. Az egyes csatornán a transzformátor feszültségét, a kettesen a HFCT jelét, a hármason a vezetett mérés jelét, a negyediken meg az antenna által vett jelet mérem.



19. ábra

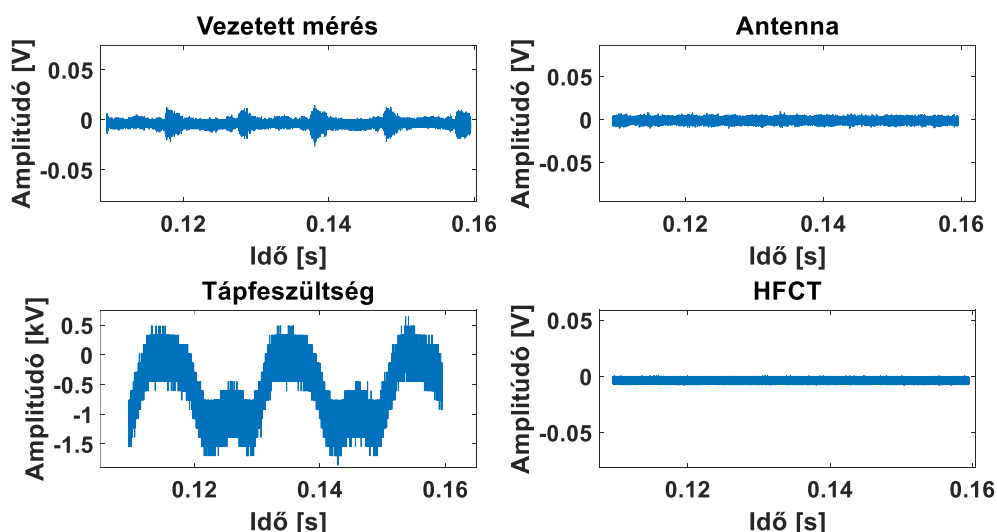
Mérési elrendezés a Nagyfeszültségű Laboratóriumban

A mérés összeállítása után a vezetett mérőműszer kalibrációját végeztem el. A műszer egy TETTEX részkisülés mérő berendezés, mely biztosít direkt kalibrációra lehetőséget. A direkt kalibráció során a műszer maga bocsát az elrendezésre ismert mennyiségű töltést, majd ezt tudjuk visszamérni és addig állítani a műszer mutatóját, míg az nem az előre beállított töltésmennyiséget mutatja vissza.



20. ábra
Részkisülés mérő műszer

A kalibráció után érdemes meggyőződni a mérési elrendezés zajszintjéről. Ehhez el kell távolítani a földelést az elrendezésről, így nem mérjük bele a földelés okozta zajokat.



21. ábra
Mérési elrendezés zajszintje

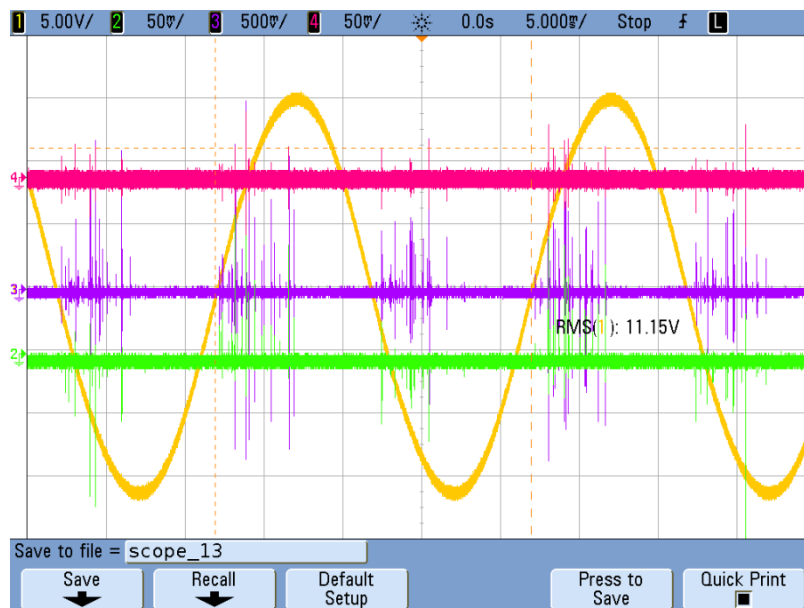
5.2 Mérés

A mérést minden minta esetében egyre növekvő feszültségekkel végeztem, így meg lehet vizsgálni milyen módon változik a szigetelőre kapcsolt feszültség függvényében a minta által és a mérési elrendezés által létrehozott részkiülések jellege. A referenciául szolgáló teljesen tömör mintákat 5 kV-tól 1 kV-os lépésekkel egészen 25 kV-ig mértem, a csatolókondenzátorra kapcsolható maximális üzemi feszültségéig.

Az üreggel rendelkező minták esetén az első mérési pont azon a feszültség szinten volt, ahol megindultak a felületi kiülések. A további mérési pontokat nem kV-onként vettem fel, hanem nagyobb lépésközzel a mérések gyorsításának érdekében. Ezeknél a mintáknál minden mérési ponton nagyjából 5 percet vártam és újból elvégeztem változatlan feszültségen a mérést annak érdekében, hogy tapasztalható-e valami időbeni változása a részkiülési jelenségeknek változatlan feszültség mellett.

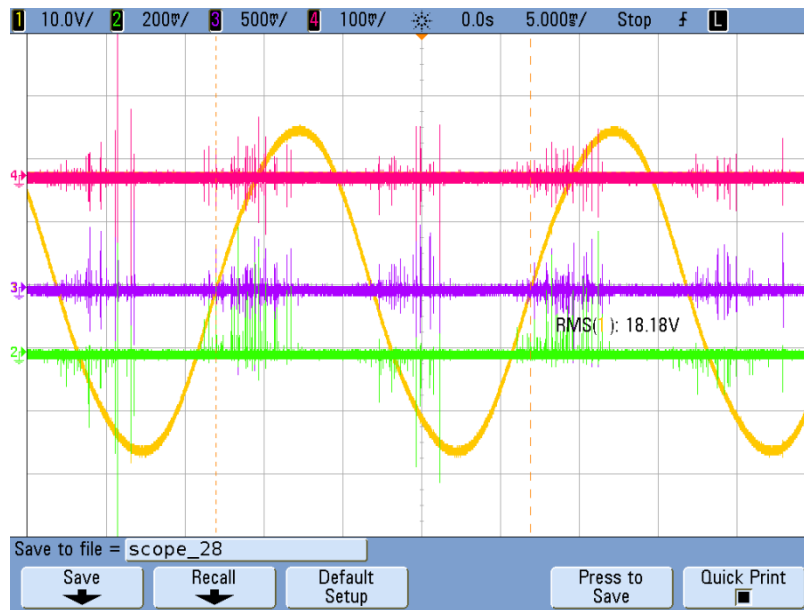
5.2.1 Mérési eredmények

A referencia korongokkal kezdtem a mérést. Elsőként az 1cm vastag korongot mértem le. Már korán 5 kV környékén megindultak a felületi kiülések, amik 11 kV-tól már jól hallhatók is voltak. Nagyjából inntől kezdtek megjelenni külső zajokra, illetve koronakiülésre utaló jelalakok is, kezdetben csak egy-egy nagyobb kiugró érték feszültség csúcsok közelében. Ez a jelenség a feszültség növekedésével állandósulni kezdett.



22. ábra

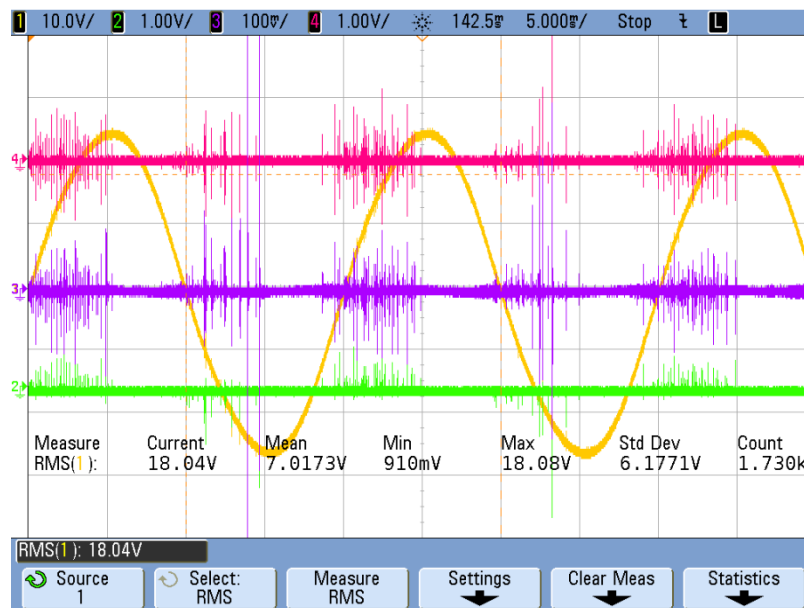
1 cm vastag referencia minta 11 kV-on



23. ábra

1 cm vastag referencia minta 18 kV-on

A mérés során tapasztalható volt, hogy az antenna a legérzékenyebb a zajokra. Többször lehetett megfigyelni, hogy az antenna csatornája teljesen eltérő jelalakot mutat mind a vezetett, mind a HFCT által mért jelektől. Az is sokszor megfigyelhető volt, hogy ha a feszültségforráson volt valamilyen zaj, azok egy az egyben megjelentek mind a három mérési módszer csatornáján.

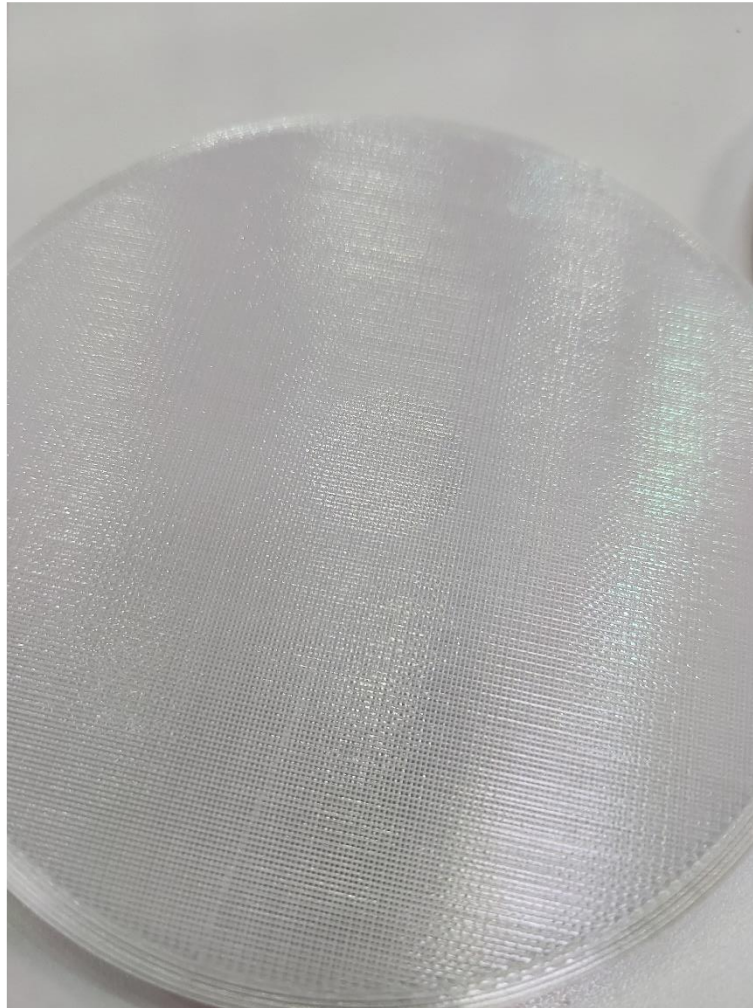


24. ábra

0,5 cm vastag referencia minta 18 kV-on

Második minta a 0,5 cm vastag teljesen tömör korong volt. Ahogy arra számítani lehetett itt még korábban megindultak a felületi kisülések és még nagyobb impulzusokat lehetett mérni azonos feszültségeken.

A mérés végeztével a korongokon látszódott a felületi kisülés nyoma. Az elektród körül enyhe elszíneződés volt megfigyelhető. Sajnos fényképen nem látszik igazán jól



25. ábra

Felületi kisülések nyomai

(25. ábra), a korong közepén látszik egy kicsit fényesebb kör, körülötte kevésbé az az anyag. A kisüléseknek köszönhetően mattá válik a korong felszíne az elektród körül. Így észrevehető az is, hogy az elektród és a korong közt nem, vagy csak nagyon csekély mennyiségű és töltésű üregkisülés keletkezett, ami nem torzítja a mérést.

A két referencia korong után az 1 cm vastag 4 mm átmérővel rendelkező korongot és annak a fémforgáccsal módosított változatát mértem. Mérés során tapasztalható volt, hogy nagyobb impulzusok mérhetők a fémot tartalmazó korong esetében.

Ezt követték a fél centiméter vastag korongok. Ezek mérése során az előbb említett jelenségeken túl nem tapasztaltam újat.

5.2.2 Eredmények kiértékelése

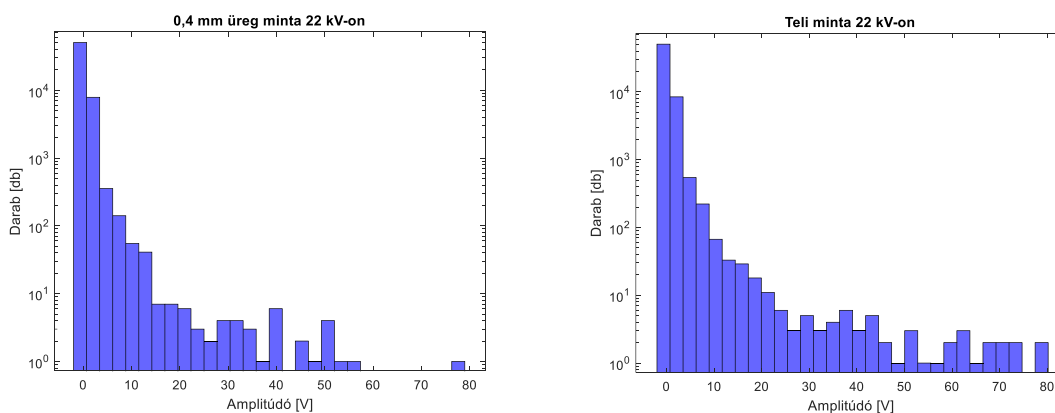
A mért értékeket MATLAB segítségével dolgoztam fel. A jelfeldolgozás során fázis szerinti és darabszám szerinti kimutatásokat készítettem. A fázis szerinti eloszlás a mért PD impulzusok amplitúdóját az 50 Hz-es hálózati feszültséggel egy ábrán mutatja, így könnyen megfigyelhető a szinuszhullámhoz képesti helyzetük. Darabszám szerinti kimutatás során az impulzusok darabszámát az amplitúdójuk függvényében ábrázoltam.

Mivel egy impulzus több lokális szélsőértéket is tartalmaz, ezért egy egyszerű időablakolós módszert alkalmaztam, minek során az időablak legnagyobb értéke után az időablak többi elemének nulla értéket adok. Ezt lehet finomítani azzal, ha nem időablakolással oldanánk meg a problémát, hanem az impulzus maximumára illesztenénk egy exponenciális burkolót, így észrevehetjük, ha a lecsengés alatt következett be újabb impulzus.

5.2.2.1 0,5 cm vastag korongok összehasonlítása

Mivel itt a két üreg átmérője eltér, ezért itt a referencia koronggal érdemes összehasonlítani őket. Az összehasonlítást a 0,4 mm-es üregátmérővel rendelkező koronggal kezdem.

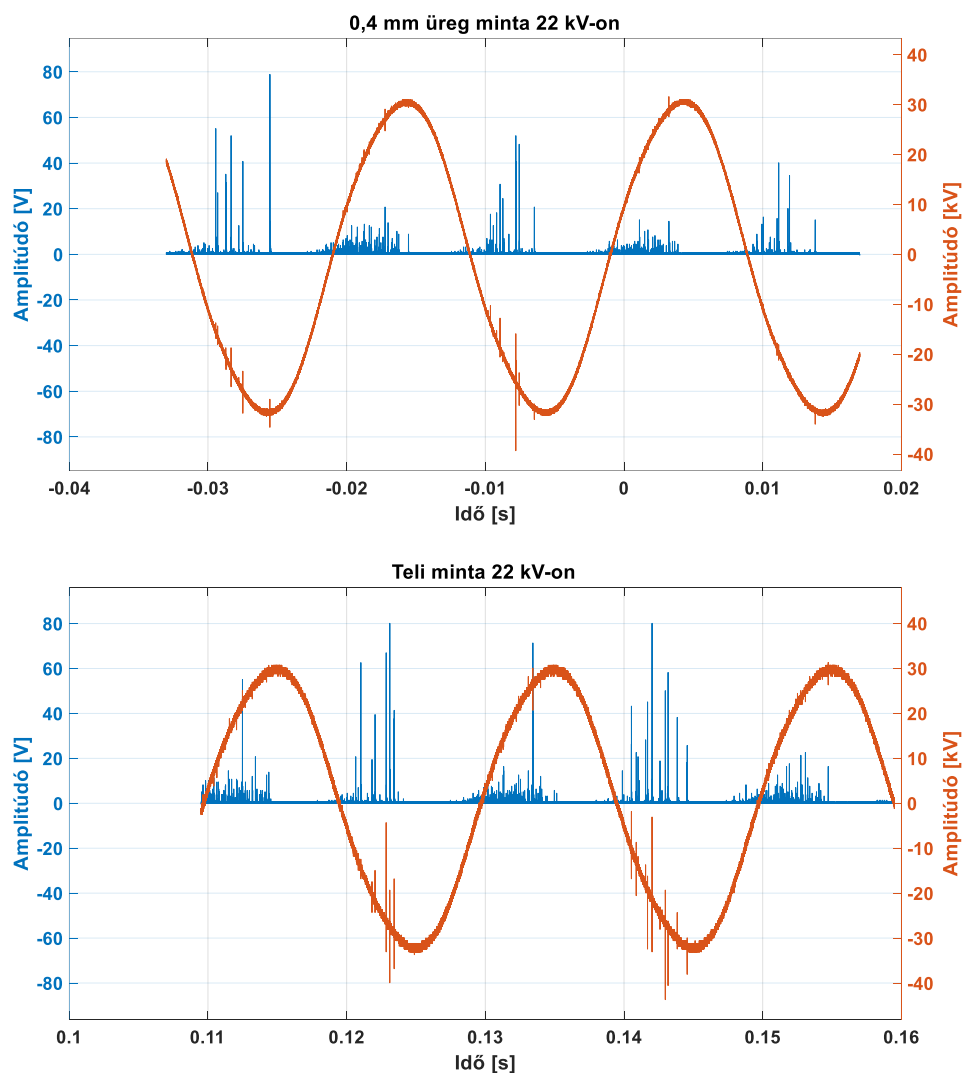
Mindkét korongnál hasonló feszültségen jelentek meg az első impulzusok. A referencia korong esetén kicsit magasabb volt ez a feszültség érték. Az előzetes szimulációk alapján 22 kV környékén alakul ki a szükséges térerősség.



26. ábra

Darabszám szerinti eloszlás 22 kV-on

A 27. ábra jól mutatja, hogy a referencia mérés során a hálózati feszültség erősen zajjal terhelt volt. Ezt sajnos nem tudtam elkerülni, így nem teljesen releváns a darabszám szerinti eloszlás. A fázis szerinti eloszláson egy minimálisan, de nagyobb és több impulzus van a nullátmeneteknél az üreggel rendelkező minta esetében.

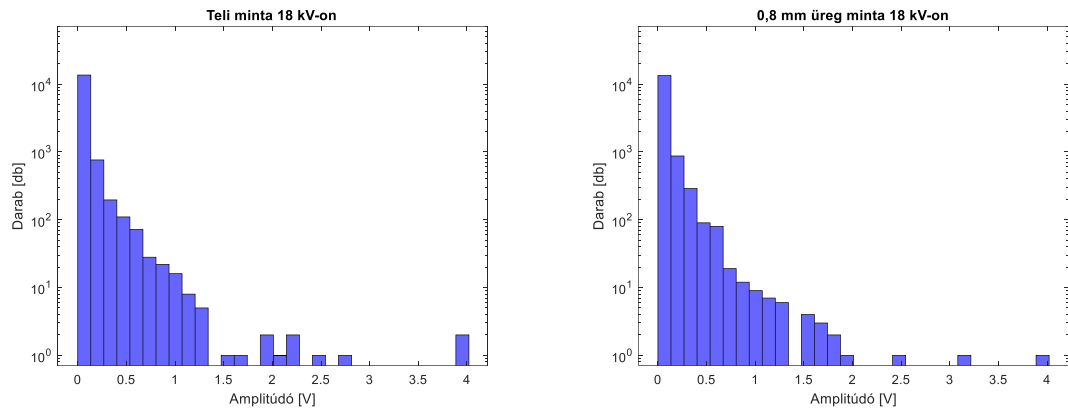


27. ábra

Fázis szerinti összehasonlítás 22 kV-on

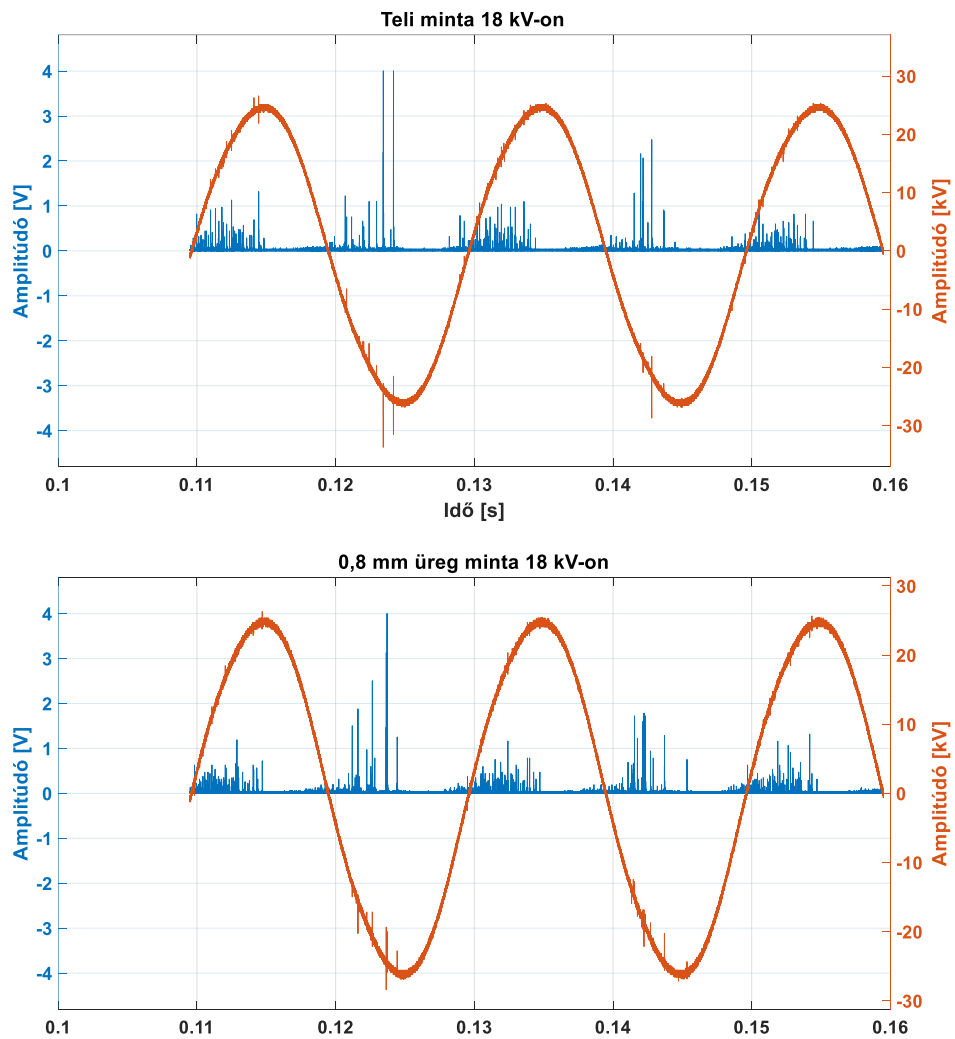
A 0,8 mm üregátmérővel rendelkező minta az előzetes számítások alapján 18 kV körül kezd el üregkisüléseket produkálni. Itt elsősorban a darabszám szerinti eloszláson lehet észrevenni egy nagy különbséget. Az 1,5 V és 2 V amplitúdójú impulzusokból sokkal több volt az üreggel rendelkező mintában. Itt is megfigyelhető, hogy a mérés erősen zajjal terhelt, szerencsére ezen két minta esetén hasonló jellegű impulzusokat hozott létre. További érdekesség, hogy a kiugróan nagy amplitúdóval rendelkező

impulzusok a zajjal egybe esnek, így feltételezni lehet, hogy azok nem a mintából származó részleges kisülések következménye.



28. ábra

Darabszám szerinti eloszlás 18 kV-on

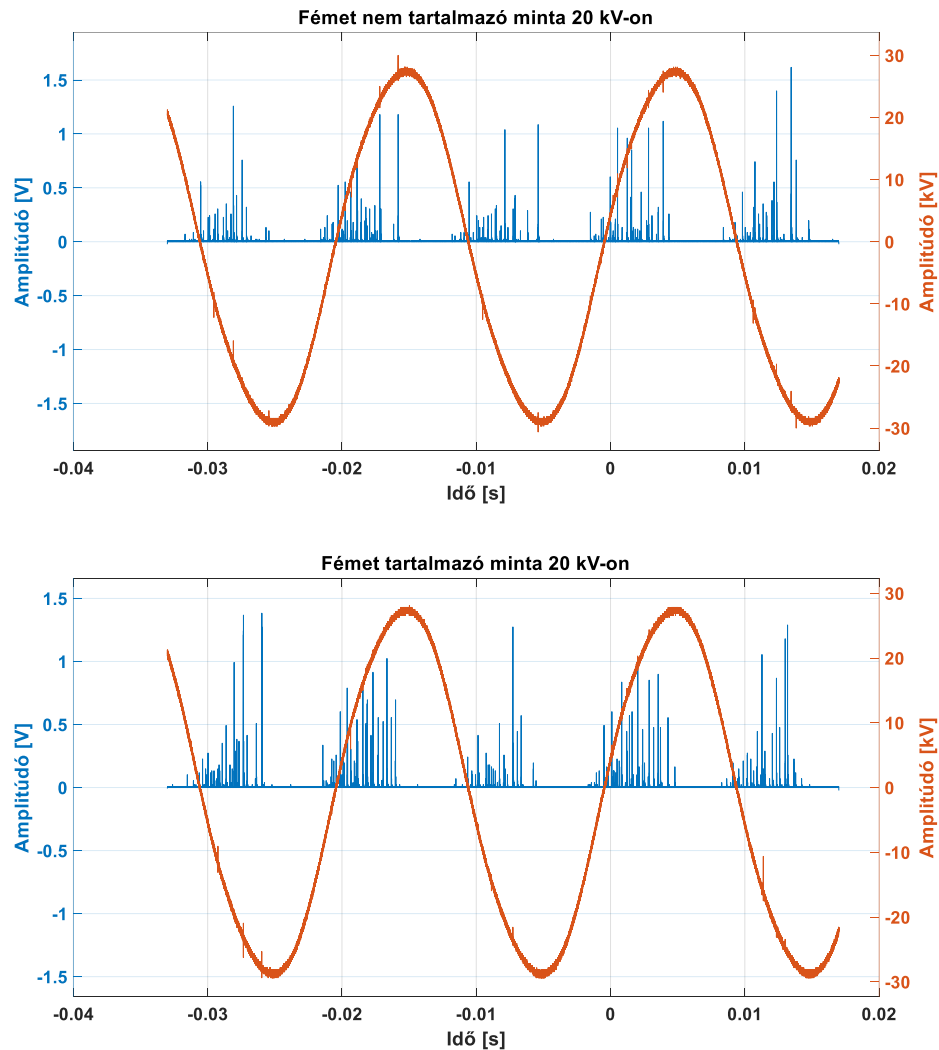


29. ábra

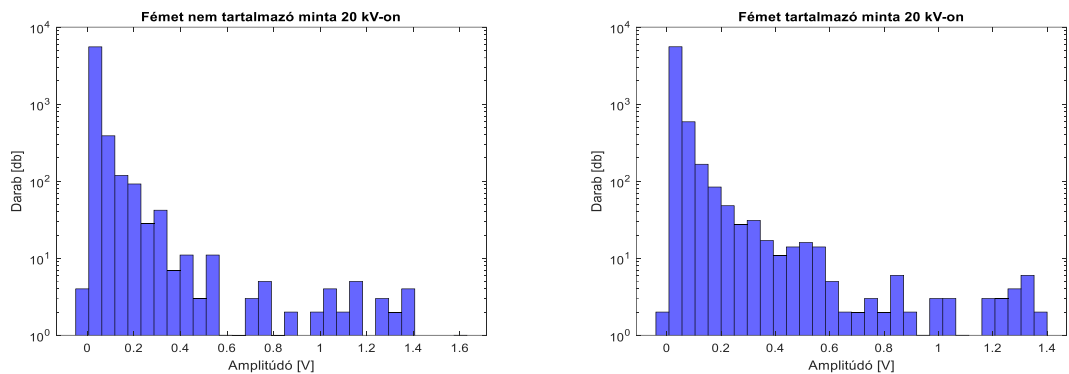
Fázis szerinti eloszlás 18 kV-on

5.2.2.2 1 cm vastag korong, fém szennyezéssel és szennyezés nélkül

Mindkét esetben megegyezett a felületi kisülés megindulásának pillanata, ami 6,92kV-nál történt meg. Mivel a fémmel szennyezett esetében nincs pontosan erre a korongra érvényes becslés, ezért a minta épségének megőrzése miatt csak 20 kV-ig végeztem a mérést. A mérések közül így ez van legközelebb ahhoz a feszültséghez, ami szükséges a kritikus térerősség kialakulásához.



30. ábra
Fázis szerinti összehasonlítás



31. ábra

Darabszám szerinti eloszlás összehasonlítása

A 31. ábra jól mutatja, hogy a fémet tartalmazó mintában több nagyobb töltésű kisülés van. A fázis szerinti eloszlásban látszik, hogy a növekvő feszültségszakaszok nullátmenetei környékén van nagyobb különbség, ami arra enged következtetni, hogy már 20 kV-on is van jelen üregkisülés a fémet tartalmazó mintában.

6 Összegzés

Ez a dolgozat mintegy megalapozásként szolgál az olyan további kutatásoknak, melyek során szilárd szigetelőket úgy módosítunk, akár utólag, akár eleve így gyártva, hogy azzal különböző műszereket lehessen tesztelni, kalibrálni. Első körben a tervezésen és szimuláción van a hangsúly, hogy minél pontosabb leképezését adhassuk a valós jelenségeknek. Ezeket természetesen mérésekkel kell validálni, majd a mérések alapján pontosítani, finomítani a modellezési fázison.

A modellezésnél nagyon fontos szerepet játszik a szigetelő anyaga. Minél több és pontosabb információnk van a szigetelő villamos paramétereiről annál valósághűbb modellt tudunk alkotni. A PETG esetén sok a bizonytalan tényező. Minden gyártó minimálisan eltérő filamentet készít, sőt még azonos gyártónál is vannak különbségek más-más időben legyártott műanyagoknál. Ezért van az, hogy bizonyos anyagra jellemző állandóra nem konkrét értéket, hanem egy tartományt adnak meg.

Az általam használt mérési elrendezésen is lehetne változtatni, például a csatoló kondenzátoron, hogy még nagyobb feszültségértékek mellett is lehessen mérni. Természetesen a kellően nagy elektromos tér létrejöttét a szigetelő vastagságának csökkentésével is el lehet érni, de ezzel a szigetelő vastagsága a benne elhelyezhető üregnek szab korlátot. A mérési elrendezésen túl sokkal finomabb és precízebb jelfeldolgozási módszerekkel lehet még pontosabbá tenni a kapott végeredményeket.

Irodalomjegyzék

- [1] Richárd Cselkó, Nagyfeszültségű Technika és Rendszermenedzsment - Részkisülések fizikája, mérése és szigetelésdiagnosztikai alkalmazása, 2023
- [2] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos Energetika Tanszék, Nagyfeszültségű Technika Csoport – Elektrotechnika jegyzet, 2020
- [3] Richárd Cselkó, „Application of Partial Discharge Measurement as a Diagnostic Tool for Low-Voltage Cables”, Ph.D. thesis, 2019
- [4] James H. Harlow, Electric power transformer engineering, 2004
- [5] G. C. Stone, Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 5; pp 891-903, 2005
- [6] N H Nik Ali , P Rapisarda , P L Lewin, Separation of Multiple Partial Discharge Sources Within a High Voltage Transformer Winding using Time Frequency Sparsity Roughness Mapping, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2016
- [7] S. Coenen, IMPROVEMENTS TO PD MEASUREMENTS FOR FACTORY AND SITE ACCEPTANCE TESTS OF POWER TRANSFORMERS, 2021
- [8] Picha, T.; Papezova, S.; Picha, S. Evaluation of Relative Permittivity and Loss Factor of 3D Printing Materials for Use in RF Electronic Applications. Processes 2022
- [9] S. Tenbohlen, M. Siegel, M. Beltle und M. Reuter, „Suitability of Ultra High Frequency Partial Discharge Measurement for Quality Assurance and Testing of Power Transformers,“ in CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM, Zürich, 2013.
- [10] M. Fritsch, M. Wolter, High-Frequency Current Transformer Design and Construction Guide, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 71, 2022
- [11] Faizol, Z.; Zubir, F.; Saman, N.M.; Ahmad, M.H.; Rahim, M.K.A.; Ayop, O.; Jusoh, M.; Majid, H.A.; Yusoff, Z. Detection Method of Partial Discharge on Transformer and Gas-Insulated Switchgear: A Review. Appl. Sci. 2023, 13, 9605.
- [12] Zachariades, C., Shuttleworth, R., Giussani, R., & MacKinlay, R. (2016). Optimization of a High Frequency Current Transformer sensor for Partial Discharge Detection using Finite Element Analysis. IEEE Sensors Journal, 16(20), 7526 - 7533.

Ábrajegyzék

1. ábra Belső kisülés kialakulása -----	7
2. ábra Felületi kisülés kialakulása -----	8
3. ábra Koronakisülés kialakulása -----	8
4. ábra Konvencionális részkisülés detektor -----	10
5. ábra UHF PD mérési elrendezés transzformátor esetén -----	11
6. ábra HFCT-k felépítése. -----	12
7. ábra Impulzusok darabszámának eloszlása -----	13
8. ábra Fázisszög szerinti eloszlás -----	14
9. ábra Fázisszög és amplitúdó szerinti darabszám -----	15
10. ábra A megtervezett részkisülés minták -----	18
11. ábra 6 mm átmérőjű üreg, 1 cm vastag korong hálójá -----	19
12. ábra Adott üregsugárhoz tartozó minimális térerősség a részkisülés kialakulásához. -----	20
13. ábra Teli minták összehasonlítása -----	21
14. ábra 0,5 cm vastag minta 0,8 mm-es üregátmérővel 25 kV-on -----	22
15. ábra 1 cm vastag minta 4 mm-es üregátmérővel 25 kV-on -----	23
16. ábra 2 cm vastag minta 16 mm-es üregátmérővel 25 kV-on -----	24
17. ábra 4 mm-es üreg fémszennyezéssel 20 kV-on -----	25
18. ábra 4 mm-es üreg fémszennyezés nélkül 20 kV-on -----	25
19. ábra Mérési elrendezés a Nagyfeszültségű Laboratóriumban -----	27
20. ábra Részkisülés mérő műszer -----	28
21. ábra Mérési elrendezés zajszintje -----	28
22. ábra 1 cm vastag referencia minta 11 kV-on -----	29
23. ábra 1 cm vastag referencia minta 18 kV-on -----	30
24. ábra 0,5 cm vastag referencia minta 18 kV-on -----	30
25. ábra Felületi kisülések nyomai -----	31
26. ábra Darabszám szerinti eloszlás 22 kV-on -----	32
27. ábra Fázis szerinti összehasonlítás 22 kV-on -----	33
28. ábra Darabszám szerinti eloszlás 18 kV-on -----	34
29. ábra Fázis szerinti eloszlás 18 kV-on -----	34
31. ábra Fázis szerinti összehasonlítás -----	35

30. ábra Darabszám szerinti eloszlás összehasonlítása	36
---	----

Függelék

MATLAB kódok

importAgilentBin

```
function [timeVector, voltageVector] = importAgilentBin(inputFilename, varargin)
% ImportAgilentBin reads the Agilent Binary Waveform filetype.
% [timeVector, voltageVector] = importAgilentBin(inputFilename)
% [timeVector, voltageVector] = importAgilentBin(inputFilename, waveform_index)
% if waveformIndex is not provided, the first waveform will be read
% voltageVector may contain two columns [MIN, MAX]

if (~exist(inputFilename))
    error('inputFilename missing.');
```

```
end

fileId = fopen(inputFilename, 'r');

% read file header
fileCookie = fread(fileId, 2, 'char');
fileVersion = fread(fileId, 2, 'char');
fileSize = fread(fileId, 1, 'int32');
nWaveforms = fread(fileId, 1, 'int32');

% verify cookie
fileCookie = char(fileCookie');
if (~strcmp(fileCookie, 'AG'))
    fclose(fileId);
    error('Unrecognized file format.');
```

```
end

% determine which waveform to read
waveformSelect = 1;
if (size(varargin) == 1 & varargin{1} <= nWaveforms)
    waveformSelect = varargin{1};
end

for waveformIndex = 1:nWaveforms
    % read waveform header
    headerSize = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = headerSize - 4;
    waveformType = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    nWaveformBuffers = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    nPoints = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    count = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    xDisplayRange = fread(fileId, 1, 'float32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    xDisplayOrigin = fread(fileId, 1, 'double'); bytesLeft = bytesLeft - 8;
    xIncrement = fread(fileId, 1, 'double'); bytesLeft = bytesLeft - 8;
    xOrigin = fread(fileId, 1, 'double'); bytesLeft = bytesLeft - 8;
    xUnits = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    yUnits = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    dateString = fread(fileId, 16, 'char'); bytesLeft = bytesLeft - 16;
    timeString = fread(fileId, 16, 'char'); bytesLeft = bytesLeft - 16;
    frameString = fread(fileId, 24, 'char'); bytesLeft = bytesLeft - 24;
    waveformString = fread(fileId, 16, 'char'); bytesLeft = bytesLeft - 16;
    timeTag = fread(fileId, 1, 'double'); bytesLeft = bytesLeft - 8;
    segmentIndex = fread(fileId, 1, 'uint32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;

    % skip over any remaining data in the header
    fseek(fileId, bytesLeft, 'cof');

    % generate time vector from xIncrement and xOrigin values
    if (waveformIndex == waveformSelect)
        timeVector = (xIncrement * [0:(nPoints-1)]) + xOrigin;
    end

    for bufferIndex = 1:nWaveformBuffers
        % read waveform buffer header
        headerSize = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = headerSize - 4;
```

```

bufferType = fread(fileId, 1, 'int16'); bytesLeft = bytesLeft - 2;
bytesPerPoint = fread(fileId, 1, 'int16'); bytesLeft = bytesLeft - 2;
bufferSize = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;

% skip over any remaining data in the header
fseek(fileId, bytesLeft, 'cof');

if (waveformIndex == waveformSelect)
    if ((bufferType == 1) | (bufferType == 2) | (bufferType == 3))
        % bufferType is PB_DATA_NORMAL, PB_DATA_MIN, or PB_DATA_MAX (float)
        voltageVector(:, bufferIndex) = fread(fileId, nPoints, 'float');
    elseif (bufferType == 4)
        % bufferType is PB_DATA_COUNTS (int32)
        voltageVector(:, bufferIndex) = fread(fileId, nPoints, '*int32');
    elseif (bufferType == 5)
        % bufferType is PB_DATA_LOGIC (int8)
        voltageVector(:, bufferIndex) = fread(fileId, nPoints, '*uint8');
    else
        % unrecognized bufferType read as unformatted bytes
        voltageVector(:, bufferIndex) = fread(fileId, bufferSize, '*uint8');
    end
else
    fseek(fileId, bufferSize, 'cof');
end
end
end
fclose(fileId);

```

smart_meter_downsample

```

%close all;
clear all;

filename='scope_306.bin';
[t, voltage1] = importAgilentBin(filename, 3);
[t, voltage2] = importAgilentBin(filename, 4);
[t, voltageb] = importAgilentBin(filename, 1);
[t, hfct] = importAgilentBin(filename, 2);

t = t-0.008;

%%
figure(2);
subplot(2,2,1)
plot(t, voltage1);
xlabel('Idő [s]');
ylabel('Amplitúdó [V]');
%xlim([-0.01 0.01]);
ylim([-1 1]);
title('Vezetett mérés');
ax = gca;
ax.FontSize = 24;
ax.FontWeight = 'bold';

%figure(2);
subplot(2,2,2)
plot(t, voltage2);
xlabel('Idő [s]');
ylabel('Amplitúdó [V]');
%xlim([-0.01 0.01]);
ylim([-0.1 0.1]);
title('Antenna');
ax = gca;
ax.FontSize = 24;
ax.FontWeight = 'bold';

%figure(3);
subplot(2,2,3)
plot(t, voltageb);
xlabel('Idő [s]');

```

```

ylabel('Amplitúdó [kV]');
xlim([-0.01 0.01]);
title('Tápfeszültség');
ax = gca;
ax.FontSize = 24;
ax.FontWeight = 'bold';

% figure(4);
subplot(2,2,4)
plot(t, hfct);
xlabel('Idő [s]');
ylabel('Amplitúdó [V]');
xlim([-0.01 0.01]);
ylim([-0.01 0.04]);
title('HFCT');
ax = gca;
ax.FontSize = 24;
ax.FontWeight = 'bold';

```

PD_measure

```

clear all;

filename='scope_161.bin';
[t, voltage1] = importAgilentBin(filename, 3);
[t, voltage2] = importAgilentBin(filename, 4);
[t, voltageb] = importAgilentBin(filename, 1);
[t, hfct] = importAgilentBin(filename, 2);

t = t-0.008;

figure;
xlabel('Idő [s]');
yyaxis left
plot(t,voltage1);
ylim([-1.2*max(abs(voltage1)) 1.2*max(abs(voltage1))]);
ylabel('Amplitúdó [V]');
yyaxis right
plot(t,voltageb);
ylim ([-1.1*max(abs((voltageb))) 1.1*max(abs(voltageb))]);
ylabel('Amplitúdó [kV]');
ax = gca;
ax.FontSize = 20;
ax.FontWeight = 'bold';
grid on;

offset = mode(voltage1);
for k = 1:size(voltage1)

    voltage1(k) = abs(voltage1(k)-offset)+offset;
end

voltage1_0 = voltage1(voltage1 ~= 0);
noise = mode(voltage1_0)*2;

for k = 1:size(voltage1)
    if voltage1(k) <= noise+0.00001
        voltage1(k) = 0;
    end
end

for k = 2:size(voltage1)-1
    if voltage1(k) ~= max(voltage1(k-1:1:k+1))
        voltage1(k) = 0;
    end
end

```

```

for k = 151:size(voltage1)-150
    if voltage1(k) == max(voltage1(k-150:1:k+149))
        voltage1(k+1:k+149) = 0;
    end
end

figure;
xlabel('Idő [s]');
yyaxis left
plot(t,voltage1);
ylim([-1.2*max(abs(voltage1)) 1.2*max(abs(voltage1))]);
ylabel('Amplitúdó [V]');
yyaxis right
plot(t,voltageb);
ylim([-1.1*max(abs((voltageb))) 1.1*max(abs(voltageb))]);
ylabel('Amplitúdó [kV]');
title('Fémet tartalmazó minta 20 kV-on');
ax = gca;
ax.FontSize = 20;
ax.FontWeight = 'bold';
grid on;

figure(5);
histogram(voltage1(voltage1 ~= 0), 30, 'FaceColor', 'b');
set(gca, 'YScale', 'log');
xlabel('Amplitúdó [V]');
ylabel('Darab [db]');
title('Fémet tartalmazó minta 20 kV-on');
FontSize = 24;

```

Eince

```

r = 0.1:0.01:10;
E = r;

for k=1:1:991
    E(k) = (24.2*10^5)*(1+8.6/sqrt(2*(r(k)/1000)*10^5))/(1000*100);
end

plot(r, E, '');
hold on;
xlabel('r [mm]', 'FontSize', 24);
ylabel('Einc [kV/cm]', 'FontSize', 24);

grid on;
YAxis.FontSize = 24;
XAxis.FontSize = 24;

```