



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

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

Szirtes Máté

**Különböző típusú részkisülések
elsugárzott elektromágneses zavarainak
vizsgálata zajszűrő rendszer
fejlesztéséhez**

KONZULENS

Cselkó Richárd

BUDAPEST, 2018

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	3
Abstract.....	4
1 Bevezetés, motiváció [1].....	5
2 Elméleti áttekintés.....	7
2.1 A részkisülések fizikája	7
2.1.1 Townsend-elmélet [2] [3] [4].....	7
2.1.2 A streamer mechanizmus [2] [3] [4] [5]	8
2.1.3 Jellemző részkisülés típusok [2] [3] [4] [6] [7] [8] [9] [10] [11].....	9
2.2 Az epoxigyanta	17
2.2.1 Kiválasztási szempontok [12] [13] [14].....	17
2.2.2 Polimerizációs folyamat [15] [16]	18
2.2.3 A kiválasztott gyanta jellemzői [17].....	19
3 Részkisülés források szimulációja és megépítése.....	21
3.1 Módszertan.....	21
3.2 Koronakisülés forrásának építése	22
3.3 Üregkisülés forrásának építése	25
3.4 Felületi kisülés forrásának építése	31
4 Részkisülés források tesztelése	36
4.1 Mérési elrendezés	36
4.1.1 GTEM cella [18].....	36
4.1.2 Feszültségforrás, részkisülés források és adatrögzítés.....	37
4.2 Mérési eredmények.....	39
4.2.1 Részkisülések PRPD ábrái [19] [20] [21] [22] [23]	39
4.2.2 Részkisülés impulzusok idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálata	48
5 Konklúzió.....	57
5.1 Eredmények értékelése	57
5.2 Ipari felhasználhatóság, jövőbeli tervek	59
Köszönetnyilvánítás	61
Ábrajegyzék.....	62
Irodalomjegyzék.....	64

Összefoglaló

A villamosenergia-rendszer stabilitása és megbízhatósága jelentős mértékben függ a hálózat különböző szintjeit összekötő transzformátorok és egyéb nagyfeszültségű berendezések üzembiztos működésétől. Ezen berendezések megbízható és biztonságos működése komoly gazdasági szempont mind a gyártók, mind az üzemeltetők számára. Egy esetleges meghibásodás fogyasztói kieséssel is járhat, mely az idő és pénzigényes javítási munkálatokon felül további pénzvesztést jelent az üzemeltető számára, miközben a hálózat megbízhatósága is csökken. A nagyfeszültségű berendezések meghibásodásait sok esetben részkiülés jelenléte előzi meg, mely kimutatható a gyári átvételi- és az időszakos diagnosztikai vizsgálatok során. Ezen vizsgálatok során olyan konvencionális részkiülés vizsgálati módszereket alkalmaznak, melyek csak a kiülés jelenlétéről és intenzitásáról adnak információt. A detektált kiülés pozíciójára, azaz a berendezés javítandó részére ezek a módszerek nem képesek becslést adni. Erre a célra napjainkban különféle kísérleti technikák állnak rendelkezésre, melyek még nem lettek átültetve a mindennapi használatba. Egy erre a célra kialakított rendszer jelentős mértékben felgyorsíthatja a hibahelyek megtalálásának és javításának procedúráját.

A dolgozat témája egy olyan mérő- és jelfeldolgozó rendszer zajszűrő egységének a továbbfejlesztése, mely a részkiülés elsugárzott elektromágneses zavarait mérve képes becslést adni annak térbeli pozíciójára. A kutatás aktuális fázisa során a már meglévő rendszer zajszűrésért felelős alegysége kerül továbbfejlesztésre, melyhez különböző típusú kiülésforrások megépítésére és a részkiülések vizsgálatára van szükség. A kutatási fázis célja megalkotni egy olyan mérőrendszert, mely a különböző típusú részkiülések jeleinek feldolgozására és ezen keresztül helyzetük meghatározására egyaránt alkalmas.

Abstract

The stability and reliability of the electric power system highly depends on the reliable operation of transformers and other high voltage equipment that connect the various levels of the network. The reliable and safe operation of these devices is a serious economic aspect for both manufacturers and operators. A possible failure may result in a loss of consumption, which, in addition to the time and money-intensive repairs, will result in additional financial loss for the operator, while the reliability of the network will also be reduced. The failure of high voltage equipment is often preceded by the presence of a partial discharge, which can be detected during the factory acceptance and periodic diagnostic tests. In these tests, conventional partial discharge examination methods are used which only provide information on the presence and intensity of the discharge. These methods cannot estimate the position of the detected discharge, i.e. the part of the equipment to be repaired. For this purpose, various experimental techniques are available today that have not yet been transposed into everyday use. A system designed for this purpose can significantly speed up the procedure of finding and correcting the faulty parts.

The subject of the study is the further development of the noise filtering unit of a measuring and signal processing system that can estimate the spatial position of the partial discharge by measuring its electromagnetic disturbances. During the current phase of the research, the existing system's noise filtering subsystem will be further developed, which requires the construction of different types of discharge sources and the examination of the partial discharges. The aim of the research phase is to create a measuring system that is suitable for processing the signals of the different types of partial discharges and thus for determining their position.

1 Bevezetés, motiváció [1]

A 21. század modern, technológiailag fejlett társadalma kritikus mértékben függ a villamosenergia-ellátás megbízható működésétől. A gazdaság közel összes szintjének alapvető működési feltétele a villamos energia folyamatos rendelkezésre állása. Az ellátás esetleges kimaradása az áramszolgáltató számára kieső fogyasztókat, így bevételcsökkenést jelent. Az ellátás kiesése rontja annak stabilitási mutatóit, melyek egy kritikus szintet átlépve komoly pénzbírságot jelenthetnek a szolgáltató számára. Egy ilyen kimaradás megbéníthatja az ipari szektor érintett szereplőit is, kieső termelést, ezzel pedig jelentős anyagi károkat okozva. A kiesés idejére ugyanígy munkaképtelenné válhat minden olyan lakossági személy is, aki munkája során elektronikus eszközöket használ, ez pedig az elvégzendő feladatok szünetelésén keresztül ronthatja a munkáltató pénzügyi helyzetét is.

A villamosenergia-rendszer megbízhatóságában kulcsfontosságú szerepe van az erőműveket, az átviteli- és az elosztó hálózatot, illetve a fogyasztókat összekötő transzformátoroknak. Ezek a berendezések képezik a villamos hálózat gráfjában a csomópontokat, így esetleges meghibásodásaik a hálózat hurkoltságát, ezen keresztül pedig az energiaellátás megbízhatóságát veszélyeztethetik. A transzformátorok nagyfeszültségű egységeinek meghibásodását sok esetben részleges kisülések (részletörés, részkisülés, partial discharge, PD) előzik meg. Ezek olyan villamos kisülések, melyek nem terjednek elektródtól elektródig, csupán lokálisan vannak jelen az elektródköz azon térrészében, ahol a villamos tér inhomogenitása miatt a térerősség meghalad egy bizonyos határértéket. Ezek a kisülések fokozatosan degradálják az adott szigetelőanyagot, csökkentve ezzel a teljes szigetelési rendszer szigetelőképességét, mely végül átütéshez, átíveléshez vezet. Egy ilyen meghibásodás a berendezés tönkremenetelén túl veszélyt jelent a környező berendezésekre és kezelőszemélyzetre is. Az okozott gazdasági károkhoz hozzáadódik a meghibásodott berendezés pénz-, munkaerő- és időigényes javítása, illetve cseréje is.

Sok komoly meghibásodás megelőzhető az azt megelőző részkisülések időben történő detektálásával, és helyzetük ismeretében az okozó hiba javításával. A detektálásra általánosan alkalmazott, szabványosított módszerek állnak rendelkezésre, a helyzet pontos meghatározására viszont csak kísérleti, vizsgálat alatt álló módszerek szerepelnek

az irodalomban. A részkisülések egyaránt keltenek vezetett elektromos, hang útján terjedő mechanikai, illetve sugárzott elektromágneses zavarokat, melyek mérését alapul véve különféle kísérleti módszerek léteznek a kisülés helyzetének meghatározására. A kutatás előző szakaszában az elektromágneses jelek mérésén alapuló módszerek tanulmányozását követően megépítésre és tesztelésre került egy olyan mérőrendszer prototípusa, melynek segítségével becslés adható a részkisülés koordinátáira egy rögzített koordináta-rendszerben.

A helymeghatározáshoz elengedhetetlen az antennákon keresztül mért, zajjal terhelt feszültségjelek megfelelő szűrése a további feldolgozás előtt. Fontos továbbá, hogy az adott kisülés típusa azonosítható legyen, illetve több kisülés esetén a mért jelek elkülöníthetők legyenek egymástól. Ezen problémák megoldásához szükség van a főbb részkisülés típusok elsugárzott zavarjeleinek vizsgálatára és karakterisztikus jellemzőik meghatározására. A dolgozatban bemutatott kutatás során különböző, levegőből és epoxigyantából álló mesterséges kisülésforrások kerültek megépítése. A létrehozott részkisülések elsugárzott elektromágneses jeleinek vizsgálatával megalapozható a mérőrendszer azon egységeinek fejlesztése, melyek a zajszűrésért, valamint a részkisülés típusának azonosításáért és elkülönítéséért felelnek.

A dolgozat első szakasza a kutatás elméleti háttérét alapozza meg a részkisülések alapvető fizikai folyamatainak bemutatásával, valamint az epoxigyanták gyártástechnológiai és kémiai háttérének általános ismertetésével. A középső szakasz leírja a mesterséges kisülésforrások elkészítésének menetét, melynek fontos részét képezik a méretezéshez és ellenőrzéshez szükséges különféle végeselemes szimulációk. A következő szakasz az elkészült forrásokon végzett méréseket és ezek kiértékelését tartalmazza, majd a dolgozatot a levont következtetések konklúziója és a jövőbeli ipari alkalmazást célul kitűző fejlesztési tervek ismertetése zárja.

2 Elméleti áttekintés

2.1 A részkisülések fizikája

2.1.1 Townsend-elmélet [2] [3] [4]

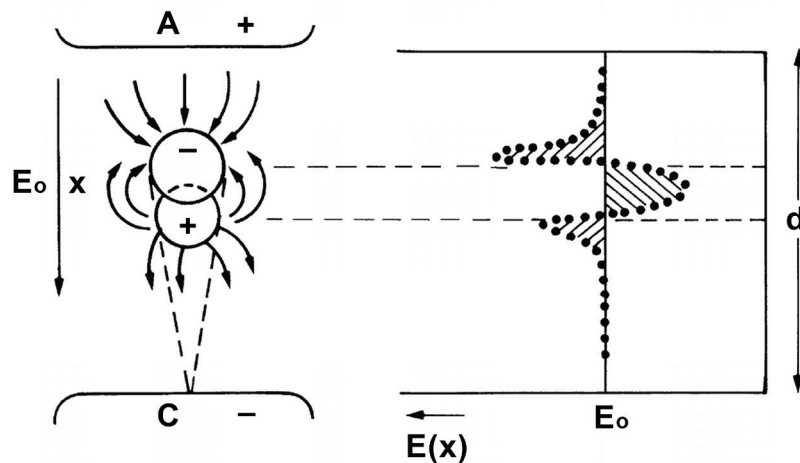
Normál légköri nyomáson és szobahőmérsékleten a gázok kiváló szigetelők. Kis térerősség esetén a levegő áramsűrűsége $10^{-16} - 10^{-17}$ A/cm² nagyságrendbe esik. Ezt az áramot a kozmikus háttérsugárzás, valamint az atmoszférában, illetve a földben található radioaktív anyagok jelenléte okozza a gázmolekulák ionizációja útján. Ennek során egy semleges molekulából hátramarad egy kis tömegű, negatív töltésű elektron, valamint egy nagyságrendekkel nagyobb tömegű, azonos abszolút töltésű pozitív ion. Nagyobb térerősségek esetén az így keletkező töltéshordozókra a villamos tér erővel hat, gyorsítva azokat. Mivel a startelektronnak is nevezett elektron tömege jelentősen kisebb, mint a pozitív ioné, a rá ható Lorentz-erő villamos térerősségtől függő komponense ($F = q \cdot E$) pedig azonos nagyságú, ezért Newton 2. törvénye szerint ($a = F/m$) gyorsulása a tömegekkel fordított arányban nagyobb lesz a pozitív ionénál.

A startelektront tehát a nagyobb térerősség jelentősen gyorsítja egészen addig, míg az bele nem ütközik egy gázatomba vagy -molekulába. A gyorsulás során szerzett mozgási energiája alapján az elektron képes rugalmas ütközésre, nagyobb energia esetén az atom gerjesztésére, melynek eredménye az atom által kibocsátott, hasonló energiaszintű foton, az ionizációs energiaszintet átlépve pedig képes az atomot ionizálni, azaz kiszakítani belőle egy új szabad elektront. Ezen energiaszint eléréséhez az elektronnak szüksége van egy megfelelően nagy szabad úthosszra, mely a gáz sűrűségével, illetve nyomásával szoros kapcsolatban van. Ha a nyomás túl nagy, nem elég nagy az átlagos szabad úthossz az ionizációhoz szükséges mozgási energia eléréséhez, túl alacsony nyomás esetén viszont az elektronnak nincs mibe beleütköznie. Megfelelő nyomás-térerősség kombináció mellett tehát az elektron képes újabb töltéshordozót létrehozni, melyet a villamos tér szintén gyorsítani fog, ez pedig a szabad töltéshordozók számának időben exponenciális növekedéséhez vezet. Ezt a jelenséget elektronlavinának, vagy az elmélet kidolgozója után Townsend lavinának, az ionizációs folyamatot pedig ütközési ionizációnak nevezzük. A Townsend-elmélet figyelembe veszi továbbá a katódból kilépő másodlagos elektronokat is, melyek létrejöhetnek a pozitív ionok katódba

ütközése során (katódemisszió), a közeledő pozitív ion és a katód között fellépő nagy villamos tér hatására (téremisszió), valamint az ütközések során gerjesztett atomokból kilépő fotonok katódra ütközésével (fotoemisszió) egyaránt. Ezek a másodlagos elektronok a villamos térbe lépve további elektronlavinákat hoznak létre, melynek hatására a kisülés önfenntartóvá, a háttérsugárzás által létrehozott töltéshordozóktól függetlenné válik. A modell szerint az áram a végtelenségig tudna nőni, a valóságban azonban a környező áramkör, valamint a kialakuló villamos ív feszültségese is korlátozza ennek értékét.

2.1.2 A streamer mechanizmus [2] [3] [4] [5]

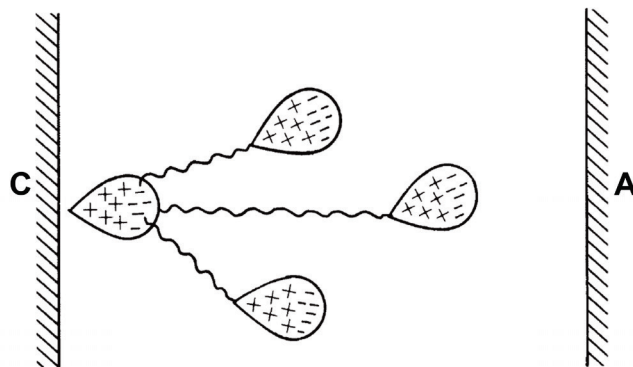
A Townsend-elmélet alapján az átütés kialakulása csak az elektródok közötti villamos tértől, a gáz nyomásától, valamint az elektródtávolságtól függ. Ez a modell a kisülés első szakaszában jól alkalmazható a fizikai folyamatok leírására, a szabad töltések mennyiségének növekedésével kialakuló tértöltések hatását viszont nem veszi figyelembe. A tapasztalat azt mutatja, hogy egy kritikus ionkoncentrációt átlépve, a lavinaáramot ugrásszerű áramnövekedés, majd az elektródköz átütése követi. Ez az ugrásszerű áramnövekedés a tértöltések által torzított villamos térrel magyarázható. Az eredeti E_0 térerősséghez viszonyított tértorzulást szemlélteti az 1. ábra.



1. ábra: Elektronlavina tértöltésének hatása az eredő villamos térre [4]

Az elektronlavina előtti és mögötti térerősségnövekedés hozzájárul a különálló elektronlavinák összeéréséhez, melynek során kialakul egy streamer kisülés, melyet a magyar szakirodalomban többnyire pamatos kisülésnek neveznek. Mindkét elnevezés a kisülés szálak jellegéből adódik, amint egymás mögötti elektronlavinák kis ionizációs

csatornákká egyesülnek. A streamer kisülés kialakulásához közel sem lenne elegendő a Townsend-elméletben tárgyalt, katódból kilépő másodlagos elektronok által indított lavinák mennyisége. A szabad töltéshordozók megfelelően nagy száma esetén az ütközési ionizáció mellett domináns folyamattá válik a gázmolekulák fotoionizációja is, melynek során a gerjesztett atomokból kilépő, vagy az elektron-ion párok rekombinációjából felszabaduló fotonok olyan molekulákba ütköznek, melyek ionizációs energiáját meghaladja energiájuk, így abból szabad elektront szakítanak ki. Az ionizáló fotonok legfőbb forrásait jelentő gerjesztett atomok keletkezése a nagy tértöltésű elektronlavinák előtti megnövekedett villamos térben a legintenzívebb. A fotoionizáció folyamatát szemlélteti a 2. ábra.



2. ábra: Fotoionizáció szemléltetése [4]

A streamer kisülés kialakulásához szükséges gyújtási térerősség (inception electric field) normál nyomású és hőmérsékletű levegőben 26 kV/cm. Erősen inhomogén villamos teret létrehozó tű-sík elektródpar esetén a streamer a tűhegynél alakul ki, ahol lokálisan nagy a villamos térerősség. A streamer kialakulását követően a kisülés fejének továbbterjedéséhez szükséges lokális villamos tér levegőben, pozitív tűelektródtól induló streamer esetén 4 – 6 kV/cm, míg negatív tűelektródtól indulva ez az érték megközelíti a 12 kV/cm-t. Ez azt is jelenti, hogy a negatív tűelektródtól induló kisülések csak nagyobb feszültség esetén vezetnek átütéshez.

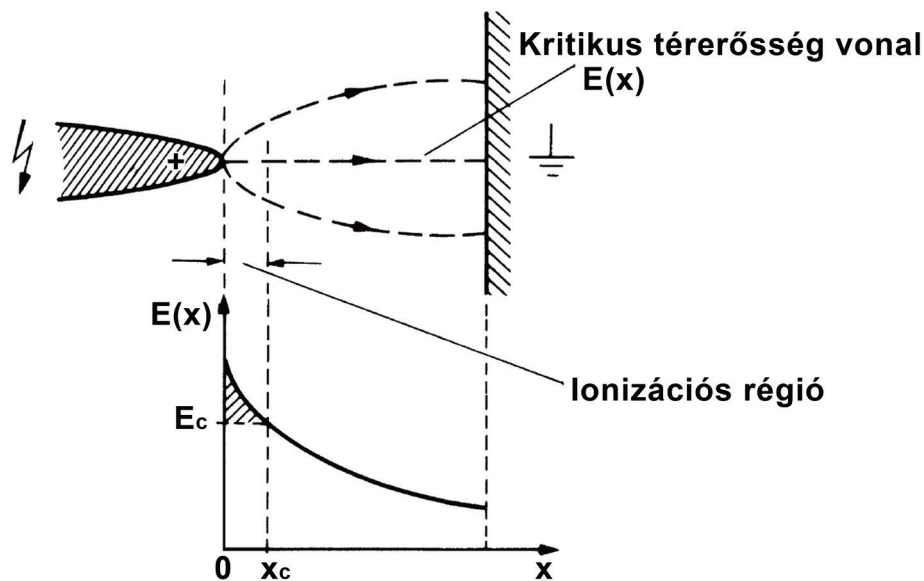
2.1.3 Jellemző részkisülés típusok [2] [3] [4] [6] [7] [8] [9] [10] [11]

A fent tárgyalt folyamatok a részkisülések témakörébe tartoznak, ugyanis az átütési csatorna kialakulásáig a kisülés az elektródköz egy térrészére korlátozódik, nem hidalva át a teljes elektródtávolságot. Ezen kisülések inhomogén villamos tér esetén huzamos ideig képesek fennállni átütés vagy átívelés bekövetkezése nélkül, amennyiben

a villamos tér kis térerősségű részei nem közelítik meg az ionizációhoz szükséges határértéket. Ezzel szemben homogén villamos tér esetén az ionizáció megjelenését követően szinte azonnal bekövetkezik az átütés. A részkisülések itt vizsgált három alaptípusa a koronakisülés, az üregkisülés, valamint a felületi kisülés.

2.1.3.1 Koronakisülés [2] [3] [4] [6]

A koronakisülés kis görbületi sugarú elektródok körüli erősen inhomogén villamos tér esetén jöhet létre gázokban vagy folyadékokban, már az átütési feszültség töredékénél. A kisülés nagy frekvenciával pulzáló hanghatással és a tű hegyénél megjelenő pontszerű diffúz fényjelenséggel jár. Ez a kisüléstípus a nagyfeszültségű technikában kiemelt figyelmet kap, ugyanis nagyfeszültségű távvezetékek sodronyain komoly teljesítményvesztést okozhat, valamint intenzív elektromágneses zavarjelei a kommunikációt is zavarhatják. A koronakisülés jellemző kísérleti elrendezése a tű-sík elektródpár, melynél különbséget kell tenni a síkhoz képest pozitív vagy negatív potenciálú tűelektródok között. Ipari 50 Hz-es frekvencián ez azt jelenti, hogy a szinusz pozitív és negatív félperiódusaiban szignifikánsan különböző folyamatok mennek végbe.

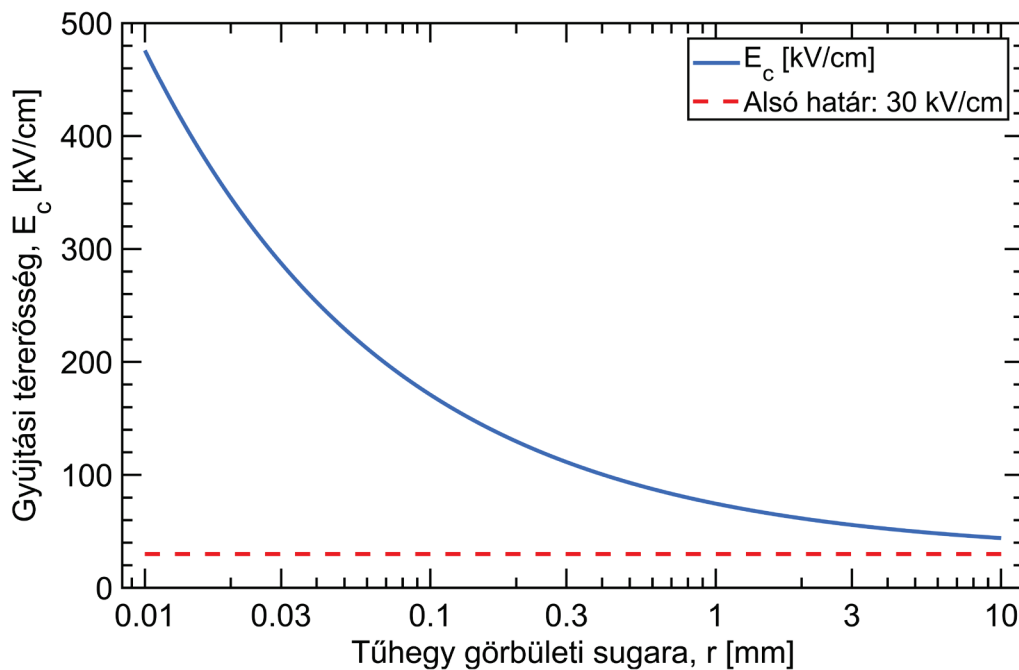


3. ábra: Tű elektród villamos tere és ionizációs régiója [4]

A tűhegytől a sík felé haladva a térerősség exponenciálisan csökkenő jellegűt mutat, ahogy azt a 3. ábra is szemlélteti. A koronakisülés a tűhegy azon környezetében alakul ki, ahol a térerősség meghaladja a korona E_c gyújtási térerősségét. Ennek meghatározásához az elrendezés közelíthető két koncentrikus gömbelektróddal, ahol a külső elektród sugara többszöröse a belső sugarának. Ilyen elrendezésre a kritikus

télerősség értéke pozitív belső elektród esetén meghatározható az alábbi empirikus összefüggés segítségével, a belső gömb (a tűhegy) r görbületi sugarának ismeretében. Az összefüggésben a görbületi sugarat cm-ben kell megadni, a kapott télerősség pedig kV/cm mértékegységű. Az összefüggés normál légköri nyomásra és szobahőmérsékletre érvényes. A koronakisülés gyújtási télerősségének változását szemlélteti a 4. ábra a tűelektród görbületi sugarának függvényében.

$$E_c = 30 + 14.1/\sqrt{r} ; [r]=1\text{cm}; [E]=1\text{kV/cm} \quad (1)$$



4. ábra: Koronakisülés gyújtási télerősségének függése a tűelektród hegyének görbületi sugarától

A pozitív és negatív koronakisülések során lejátszódó eltérő folyamatok következtében negatív korona esetén ez a határtélerősség alacsonyabbnak bizonyul, így a szinusz negatív félperiódusában már kisebb feszültség esetén megindulnak a koronakisülések. Negatív korona esetén alacsonyabb télerősség mellett elektronlavinákból álló, úgynevezett Trichel-impulzusok alakulnak ki az ionizációs régióban. Az elektródból kilépő elektronlavinák a régió határához érve lelassulnak és nem ionizálnak tovább. A régió határán így felgyűlő elektronokkal az elektronegatív oxigén molekulák negatív ionokból álló töltésfelhőt hoznak létre, mely lecsökkenti a tűhegy körüli télerősséget, megakadályozva a további elektronlavinák kialakulását. A következő impulzus akkor jelenik meg, amikor a nagy tömegű negatív ionokból álló tértöltés megfelelő távolságra jutott a tűhegytől. Ennek megfelelően a Trichel-impulzusok szabályos frekvenciával és közel változatlan csúcserősséggel ismétlődnek, amíg a feszültség

meghaladja a negatív korona gyújtási feszültségét. A feszültség növelésével az impulzusok ismétlődési frekvenciája nő, csúcstértékük pedig csökken, míg végül egy keskeny átmeneti szakasz során megszűnnek, majd a térerősség további növelésével folytonosan fénylő kisülés jelenik meg a tű hegyén, melyet parázsfény kisülésnek is neveznek (glow discharge). Igen nagy térerősség esetén negatív streamer kisülések indulnak meg a tű felől, melyek a térerősség további növelésével átütéshez vezetnek.

Pozitív korona esetén nagyobb az ionizációhoz szükséges térerősség szintje, valamint ebben az esetben nincsenek jelen Trichel-impulzusok. A pozitív gyújtási feszültséget elérve egy szűk feszültségtartományban pozitív streamerek indulnak meg a tűhegytől, változó ismétlődési gyakorisággal és ionizációs csatornahosszal. A keletkező áramimpulzusok csúcstérteke arányos a kialakuló streamer fizikai hosszával. A feszültség növelésével a streamerek egyre nagyobb gyakorisággal alakulnak ki, majd ebből a keskeny feszültségtartományból kilépve a tranziens impulzusok megszűnnek, a kisülés önfenntartóvá válik és a negatív esethez hasonló diffúz fényű kisülés jelenik meg a tű hegyénél. A feszültség további növelésével a fényjelenség kiterjedése és intenzitása is nő. Ennél nagyobb feszültség esetén újabb, az előzőnél intenzívebb streamer kisülések jelennek meg, melyek rövidesen átütéshez is vezetnek. Ahogy az előző fejezet részben is szerepelt, a pozitív streamerek terjedéséhez kisebb térerősség is elegendő, így 50 Hz-es váltakozó feszültség esetén a koronakisülés utáni átütés mindig a pozitív félperiódusban alakul ki.

2.1.3.2 Üregkisülés [4] [7] [8] [9]

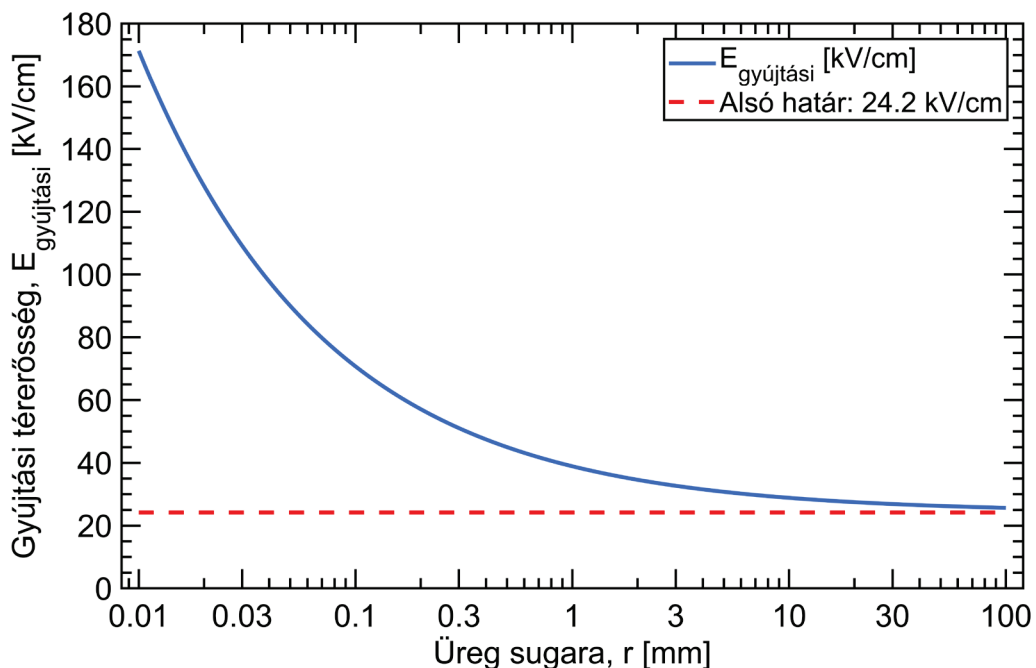
Az üregkisülés szilárd szigetelőanyagok kis méretű, gázzal töltött zárványaiban vagy folyékony szigetelőanyagok gázbuborékjaiban alakulhat ki. Az üregkisülés legegyszerűbb kísérleti elrendezése a homogén villamos térbe helyezett szilárd szigetelőanyag közepén található légbuborék. A levegő relatív permittivitásának ($\epsilon_{r, \text{levegő}} = 1$) és villamos szilárdságának ($E_{sz, \text{levegő}} \cong 26 \text{ kV/cm}$) egyaránt többszöröse a szilárd szigetelőanyagok relatív permittivitása és villamos szilárdsága. A villamos tér eloszlásának megértéséhez először közelítsük a gömbszimmetrikus buborékot egy kocka alakú üreggel, a felületi töltéssűrűséget pedig tekintsük zérusnak. Az utóbbi feltevés 50 Hz-es váltakozó feszültség esetén helytálló. A hálózati frekvenciás feszültség elektromágneses szempontból statikusnak tekinthető minden időpillanatban, így a Maxwell-egyenletek elektrosztatikai összefüggései érvényesek rá. Ennek megfelelően, az

üregbe belépve a D eltolásvektor nagysága és iránya is változatlan, a két elektród közötti tér minden pontjában azonos. Az üreg belsejében fennálló homogén térerősségre a $D = E \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ egyenlet átrendezésével az $E_{\text{üreg}} = E_{\text{szilárd}} \cdot \frac{\epsilon_r, \text{ szilárd}}{\epsilon_r, \text{ levegő}}$ összefüggést kapjuk. Ebből látható, hogy a kisebb villamos szilárdságú üregben lesz többszörös a térerősség, így könnyedén kialakulhat villamos kisülés az üreg belsejében. Gömbszimmetrikus, levegővel töltött üreg esetén az f térerősség erősítési tényezőt a (2) egyenlet írja le, melyből látható, hogy a függőleges falú modellhez hasonlóan az üreg méretétől függetlennek tekinti a benne kialakuló térerősséget. Ez abban az esetben teljesül, ha az üreg átmérője nem közelíti meg a szilárd szigetelőanyag vastagságát.

$$E_{\text{üreg}} = f \cdot E_{\text{szilárd}}, \quad f = \frac{3 \cdot \epsilon_r, \text{ szilárd}}{1 + 2 \cdot \epsilon_r, \text{ szilárd}} \quad (2)$$

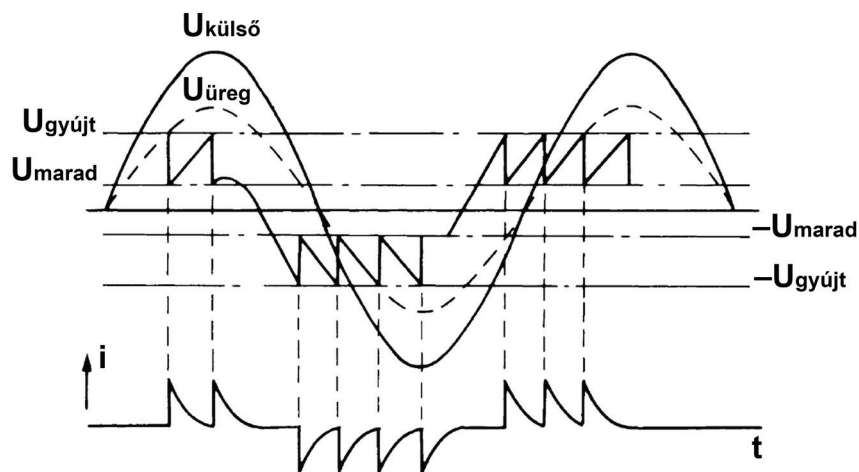
Figyelembe kell venni, hogy a buborékok méretének csökkenésével meredeken növekszik az üregkisülés gyújtási térerőssége. Ez meghatározható a (3) egyenlet empirikus összefüggéséből, mely normál légköri nyomást és szobahőmérsékletet feltételez a légbuborék belsejében. Az összefüggésben az üreg r sugarát m-ben kell megadni, a kapott térerősség pedig V/m mértékegységű. Az üregkisülés gyújtási térerősségének változását szemlélteti az 5. ábra az üreg sugarának függvényében.

$$E_{\text{gyújtási, üreg}} = 24.2 \cdot 10^5 \cdot \left(1 + \frac{8.6}{\sqrt{2 \cdot r \cdot 10^5}}\right); \quad [r]=1\text{m}; [E]=1\text{V/m} \quad (3)$$

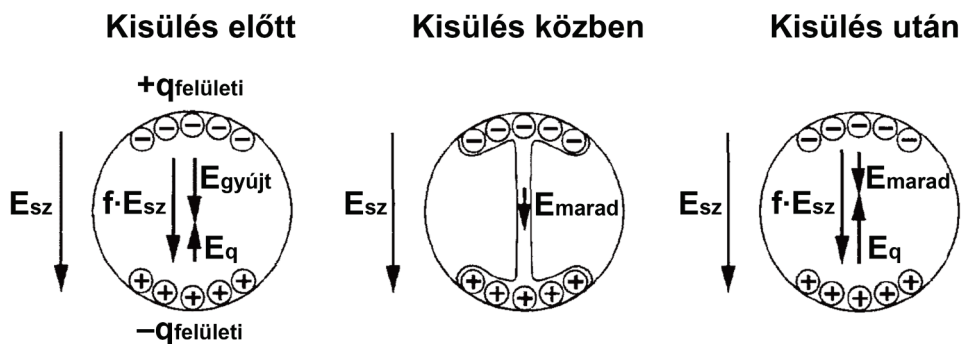


5. ábra: Üregkisülés gyújtási térerősségének függése a gömbszimmetrikus légüreg sugarától

A kísérleti mintára megfelelő nagyságú 50 Hz-es váltakozó feszültséget kapcsolva az üreg belsejében a térerősség a feszültséggel arányosan növekedni kezd, majd az $E_{\text{gyűjtási, üreg}}$ gyűjtési térerősséget elérve, a szükséges startelektron jelenléte esetén kialakul egy streamer kisülés, mely a légüreg adott elektróddal átellenes falára az elektróddal azonos polaritású töltéseket juttat. Mivel a körülvevő szigetelőanyag vezetőképessége elhanyagolható, az átvitt töltések az üreg felületén maradnak, az eredeti $f \cdot E_{\text{szilárd}}$ térerősséggel ellentétes irányú E_q térerősség komponenst létrehozva. A streamer kisülés során a töltések átvitele, azaz E_q növekedése addig tart, míg az eredő térerősség le nem csökken a streamer csatorna térerősségének megfelelő $E_{\text{maradó}} = E_{\text{gyűjtási, üreg}} - E_q$ értékre. Ezt követően az üreg eredő térerőssége az $E_{\text{üreg}} = f \cdot E_{\text{szilárd}} - E_q$ összefüggés szerint változik tovább egészen addig, míg abszolútértéke ismét el nem éri a gyűjtési térerősséget. A bemutatott jelenség a szinusz nullátmenete körül induló és csúcserőke előtt abbamaradó áramimpulzusokat hoz létre mindkét félperiódusra azonos jelleggel, ahogy azt a 6. ábra is szemlélteti. Az üregben lejátszódó folyamatokat a 7. ábra mutatja.



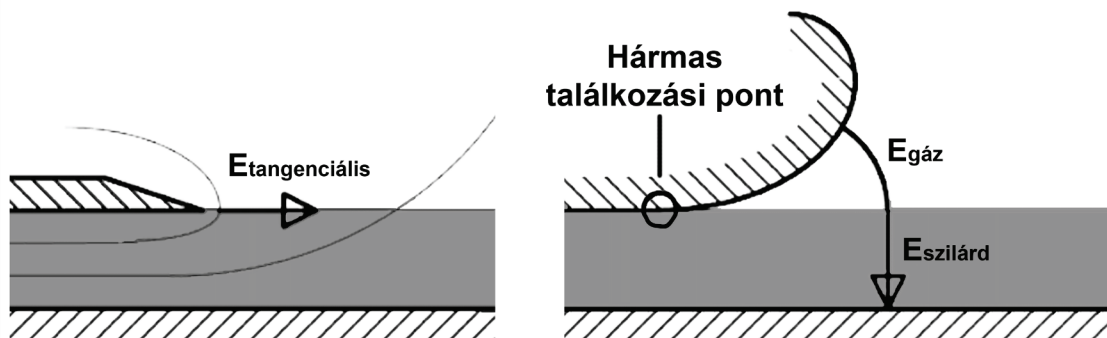
6. ábra: Gázüreg feszültsége és árama az idő függvényében üregkisülés jelenléte esetén [4]



7. ábra: Gázüreg villamos terének alakulása üregkisülés során [9]

2.1.3.3 Felületi kisülés [2] [3] [10] [11]

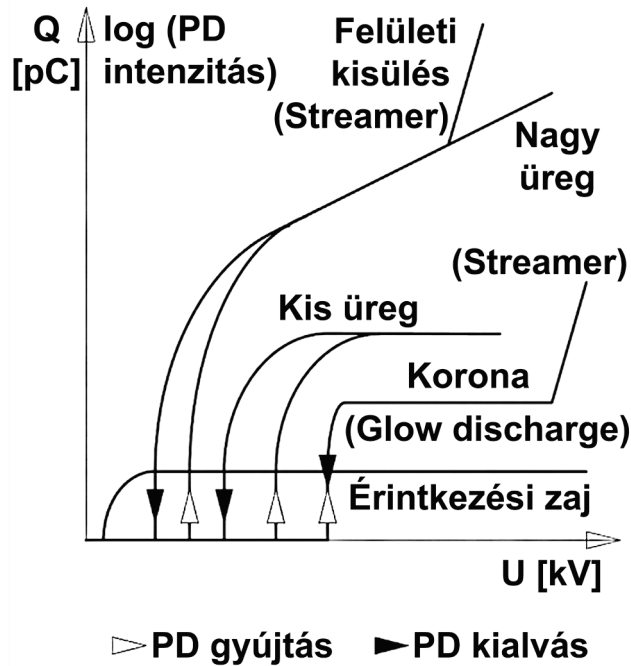
Felületi kisülések az úgynevezett hármastalálkozási pont közelében jöhetnek létre. E nevezetes pont az egyik elektród, a szilárd szigetelőanyag, valamint folyékony vagy gáz halmazállapotú szigetelőanyag találkozásánál található, ahol a másik elektród tipikusan nagyobb kiterjedésű és a szilárd szigetelőanyag túoldalán helyezkedik el. A továbbiakban gáz halmazállapotú közegekről lesz szó. Ezt a kisüléstípust erősen befolyásolja az elektródok alakja. Éles, kis görbületi sugarú elektródok esetén a gyújtási térerősséget a felületi térerősség tangenciális komponensének kell elérnie, míg lekerekített szélű elektródok esetén az elektród és a szilárd szigetelőanyag közötti gázzal kitöltött térrészben a villamos tér abszolút értékének kell meghaladnia a gyújtási térerősséget. Éles elektród esetén a hármastalálkozási pontnál folytonos, parázsfény kisülés jön létre, majd ez alakul át a felület mentén terjedő streamer kisüléssé. Ezzel szemben a lekerekített szélű elektródnál a találkozási pont melletti légrés átütése következik be, melyet egyből a streamer követ. Ezt a két elrendezést szemlélteti a 8. ábra.



8. ábra: Felületi kisülés két jellegzetes elrendezése [2]

A nagyfeszültségű technikában számos szigetelési elrendezésnél elkerülhetetlen a tangenciális tér, illetve sok esetben találkozunk a hármastalálkozási ponttal is, melynek következtében gyakori a felületi kisülések kialakulása. Ehhez intenzíven hozzájárul az a tény is, hogy szilárd szigetelőfelülettel párhuzamosan a gázok villamos szilárdsága jelentősen kisebb, mint tisztán gázzal kitöltött elektródköz esetén. Ennek két legfőbb oka, hogy az anyag felületi szabálytalanságai miatt a felületi térerősség mikroszkopikus szinten igen egyenetlen, erős inhomogenitásokat tartalmaz, valamint a felületből a gyengén kötött töltéshordozók már kisebb térerősségek esetén is ki tudnak lépni, megindítva ezzel a kisülési folyamatot. A felületi villamos szilárdságot jelentősen befolyásolja továbbá a szilárd szigetelőanyag hidrofób vagy hidrofil jellege, illetve a

páratartalom, és egyéb szennyeződések jelenléte. További problémát jelent, hogy a három alapvető részkisülés típus közül a felületi kisülések a legintenzívebbek, így ezek képesek a legnagyobb mértékben degradálni az adott szigetelőanyagot. A tárgyalt részkisülés típusok egymáshoz viszonyított intenzitását a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra: Alapvető részkisülés típusok intenzitásának összehasonlítása [2]

A felületi kisülés áramimpulzusainak kialakulása lekerekített szélű elektród és váltakozó feszültség esetén hasonló folyamatokon alapszik, mint az üregkisülés impulzusai, azzal a különbséggel, hogy a légrés átütése után a töltések nem maradnak a helyükön, hanem a tangenciális tér hatására fokozatosan eltávolodnak a kritikus térrésztől. Ekkor, az üregkisülés esetén tárgyalt jelöléssel élve, E_q csökken, így az eredő térerősség az átütést követően az üregkisüléshez képest nagyobb meredekséggel növekszik, melynek eredményeként a keletkező kisülési áramimpulzusok eltolódnak a szinusz csúcsa felé mindkét félperiódus esetén. Adott feszültség mellett az impulzusok nagysága változó és függ az adott félperiódus polaritásától is. Ez abból is látszik, hogy az üregkisüléssel ellentétben a felületi kisülés elrendezése aszimmetrikus. A feszültség növekedésével a kisülési impulzusok csúcserőssége nő, ismétlődési frekvenciájuk viszont csupán kis mértékben változik.

2.2 Az epoxigyanta

2.2.1 Kiválasztási szempontok [12] [13] [14]

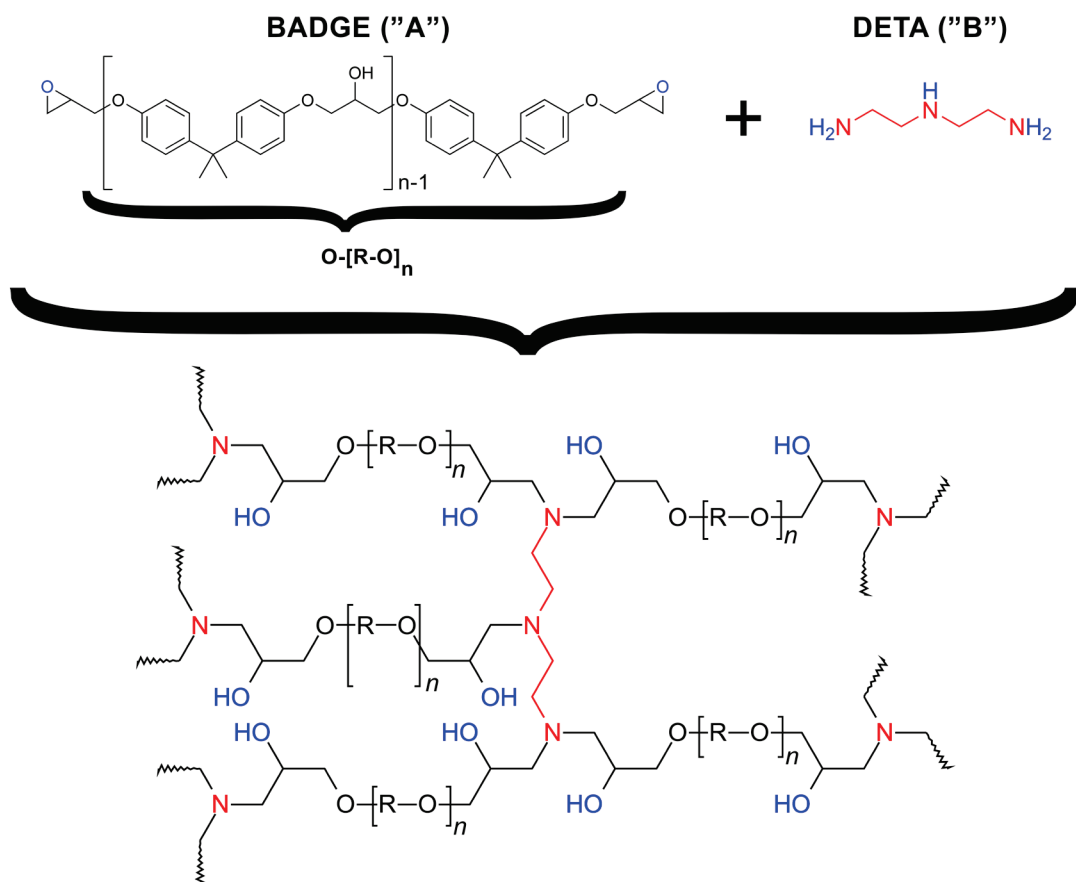
Az üreg-, valamint a felületi kisülés létrehozásához szükség van szilárd szigetelőanyagra is, melynek fizikai és kémiai jellemzői mindkét esetben befolyásolják a kisülés tulajdonságait. Ezt célszerű olyan anyagnak választani, ami valós ipari felhasználás esetén is előfordulhat, ezáltal hitelesebb kép kapható a gyakorlatban is előforduló rész kisülések jellemzőiről. A helymeghatározó mérőrendszer célzott felhasználási területe a száraztranszformátorok gyártástechnológiája. Ezen transzformátorok tekercselése a hagyományos olajjal töltött fémház helyett epoxigyantába van belemélyítve. Tekintve, hogy az olaj permittivitása, így a benne terjedő elektromágneses hullám sebessége is erősen frekvenciafüggő, a kialakított mérőrendszer olajtranszformátorokra vonatkozó alkalmazása komoly akadályokba ütközne. Ezzel szemben a száraztranszformátorok esetén a levegő permittivitása frekvenciafüggetlen, valamint az epoxigyantáé is csupán kis mértékben változik egy igen széles frekvenciatartományban. Az elsugárzott elektromágneses jelek epoxigyantában való terjedési sebességének enyhe frekvenciafüggése nem okoz komolyabb problémát, ugyanis a gyanta kiterjedése, jobb szigetelőképességének köszönhetően, sokkal kisebb, mint egy azonos specifikációjú olajtranszformátor olajtere lenne. Ez azt eredményezi, hogy az epoxi által esetlegesen a jel érkezési idejébe vitt késleltetés a helymeghatározás pontossága szempontjából elhanyagolható mértékűvé válik. A 10. ábra egy jellemző felépítésű száraztranszformátort ábrázol.



10. ábra: Epoxiba öntött tekercselésű száraztranszformátor [14]

2.2.2 Polimerizációs folyamat [15] [16]

A fenti szempontokat figyelembe véve, a megépítendő üreg- és felületi kiséülés források elkészítéséhez a választás a száraztranszformátorok szigetelőanyagát is képező epoxigyantára esett. A szigetelőanyag elkészítése a folyékony gyanta („A” komponens) és térhálósító szer („B” komponens) megfelelő tömegarányú összekeverésével kezdődik. Ezt követi az úgynevezett fazékidő, mely alatt a gyanta viszkozitása megduplázódik. Ez alatt az idő alatt a gyanta még szabadon manipulálható. Ezt követően a gyantában meginduló térhálósodási polimerizációs folyamatok már aktívan zajlanak, így a gyanta rövidesen géles állapotba kerül, melynek a bekövetkezését a kikeveréstől számított gélidő jelzi. A gélidő eltelte után már kifejezetten tilos a gyantát manipulálni, ugyanis ez a már kialakult kötések károsodását okozza, mely jelentősen lerontja a kikeményedett anyag fizikai és kémiai tulajdonságait. Ebben az időszakban a gyanta gumyszerű átmeneti állapotot követően fokozatosan megkeményedik. A kikeveréstől számított átkeményedési idő letelte után a polimerizációs folyamatok befejezettek tekinthetők, a minta ebben az állapotában már csiszolható, terhelhető.



11. ábra: Epoxigyanta polimerizációs folyamata

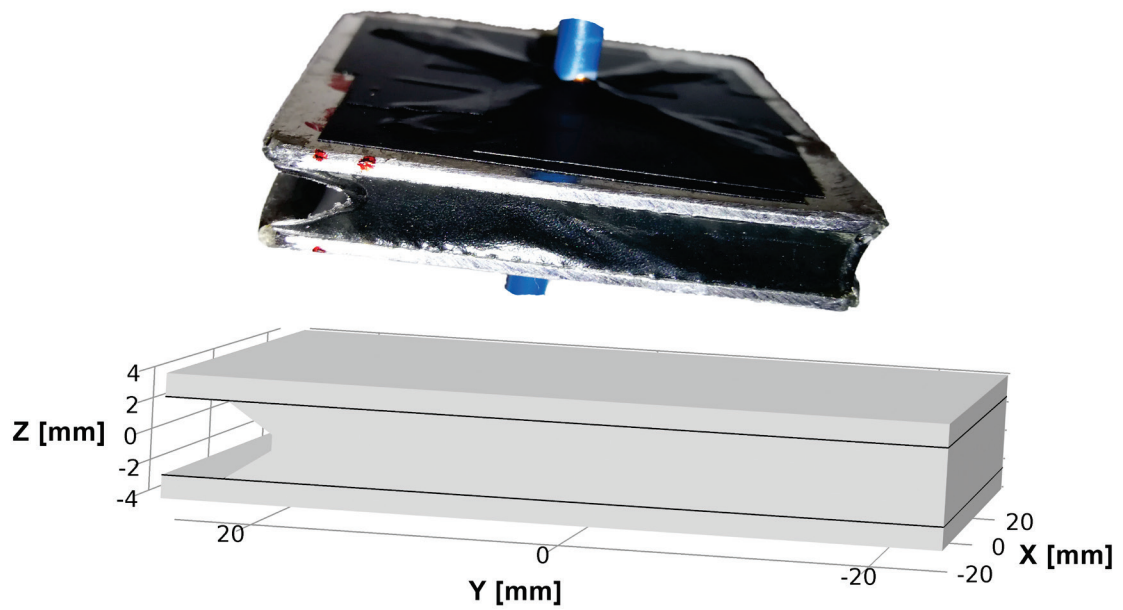
Az epoxigyanták egyik leggyakoribb „A” komponense a „Bisfenol-A-diglicidil-éter” (BADGE), mely n darab láncba rendeződött monomerból áll, két végén 1-1 szabad oxigénatommal (O). Egy gyakori „B” komponens a „Dietilén-triamin” (DETA), melynek szabad amin csoportjai (NH₂ és NH) a polimerizáció során reakcióba lépnek az n tagú monomerláncok végein található oxigénatomokkal, összekötve ezzel egymással az eredetileg különálló láncokat. Az így kapott molekulaszervezet az eredeti kötetlen, szálas elrendezés helyett egy térben rögzített, erősen térhálós szerkezet, melynek igen sok pozitív fizikai és kémiai tulajdonsága van, ezért is használják az ipar különböző területein előszeretettel. A leírt polimerizációs folyamatot szemlélteti a 11. ábra.

2.2.3 A kiválasztott gyanta jellemzői [17]

A források elkészítéséhez egy 3:1 (A:B) keverési tömegarányú, szobahőmérsékleten térhálósodó típust választottunk, melynek fazék-, gél-, valamint átkeményedési ideje 5, 9, illetve 24-36 óra volt. Ez szükség esetén lehetőséget adott a formába öntés előtt a kikevert gyanta megfelelő ideig történő vákuum alá helyezésére, a nemkívánt gáztartalom eltávolításához. Az öntés előtt az öntőformák belső felületére egy vékony teflon réteg került felvitelre, ehhez az anyaghoz ugyanis az epoxi nem képes hozzákötni, így a kikeményedett minták kivehetőek lesznek a formából.

Az epoxigyanták gyártói dokumentációi alapján a kikeményedett anyag relatív permittivitása (ϵ_r) 2.91 – 4.17, villamos szilárdsága pedig 165 – 185 kV/cm. Mivel a relatív permittivitás átlagos 3.54-es értékéhez képest a megadott tartomány 30%-nál nagyobb eltérést is megenged, így a további szimulációk előtt szükséges az alkalmazott anyag pontos permittivitásának megállapítása. Ehhez a gyantát dielektrikumként használva, a 12. ábrán látható síkkondenzátor lett megépítve, majd modellezve. A modellezés során kiemelt figyelmet igényelt az öntési technológia okozta V alakú légrés a két fémlemez között. Az elkészült síkkondenzátor kapacitása 5 és 10 V_{AC} feszültséggel, 25, 50 és 100 Hz frekvenciákon lett megmérve egy 0.05% maximális hibájú dedikált műszerrel. A 6 darab öt vezetékes (5W) mérés eredményei a vártaknak megfelelően nem mutattak szignifikáns eltérést, átlaguk pedig 15.22 pF-nak adódott. A szimulációk során az anyag relatív permittivitásának állításával néhány iteráció után a permittivitás megfelelő értékére $\epsilon_r=3.545$ adódott, ekkor ugyanis a szimulációs eredményekből számított kapacitás 15.23 pF értéket vett fel, ami már a mérési eredmények szórásán

belülre esett. Látható, hogy a szimulációk helyesek voltak, hisz a kapott érték közel azonos az elvi 3.54-es középértékkel.



12. ábra: Epoxi permittivását meghatározó síkkondenzátor és szimulációs modellje

3 Részkisülés források szimulációja és megépítése

3.1 Módszertan

A kutatás célkitűzése a dolgozat első felében bemutatott három részkisülés típus mesterséges előállítására és ezek elszárgzott elektromágneses jeleinek a vizsgálata. A vizsgálatok során egy 230 V_{AC} / 7000 V_{AC} áttételű transzformátor szolgált feszültségforrásként. A források megépítését a megfelelő méretek meghatározása érdekében előzetes, méretezési szimulációk előzték meg. Az így kapott eredményeket támpontként használva kerültek megépítésre a források, majd a végeredményről készült modelleken végzett szimulációkkal ellenőrzésre került az elérni kívánt villamos tereioszlás teljesülése.

A kutatás során végeeselemes modellező program segítségével készültek szimulációk a villamos tereioszlására a modellezett forrásokban. Mivel az alkalmazott 50 Hz-es váltakozó feszültség elektromágneses szempontból statikus problémának tekinthető, így a szimulációk során a Maxwell-egyenletek alábbi, elektrosztatikus esetre egyszerűsített alakjai használhatók. Az egyenletekben \vec{D} és \vec{E} az eltolás- és tereioszlásvektorok, $\rho_{\text{térfoati}}$ a terefoati töltéssűrűség, ϵ_0 és ϵ_r pedig a vákuum- és relatív permittivitás. A nabla vektoroperátor alatt a $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ összefüggést kell érteni.

$$\rho_{\text{térfoati}} = \nabla \cdot \vec{D}(x, y, z) \quad (4)$$

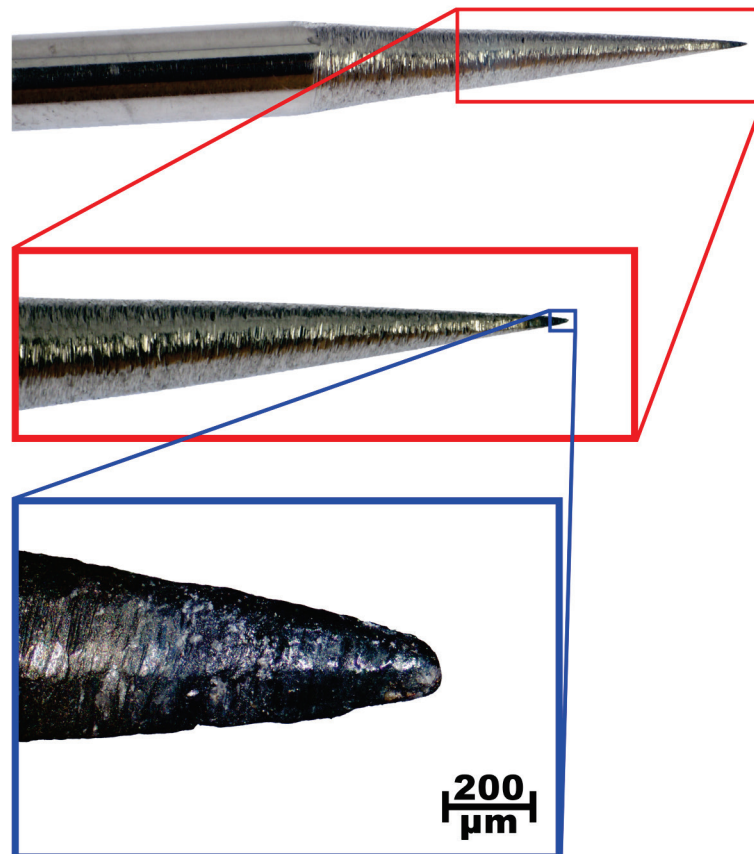
$$\vec{E}(x, y, z) = -\nabla U \quad (5)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \vec{E} \quad (6)$$

A szimulációk során peremfeltételként a vizsgált geometria meghatározott elektródfelületeire vonatkozó potenciálviszonyok lettek megadva. A végeeselemes szimulációhoz az elkészített háromdimenziós modellt hálózni (meshing) kell, mely a térbeli geometria elemi tetraéderekre való felbontását jelenti. Az algoritmus ezt követően ezekre az elemi tetraéderekre oldja meg fenti egyenleteket.

3.2 Koronakisülés forrásának építése

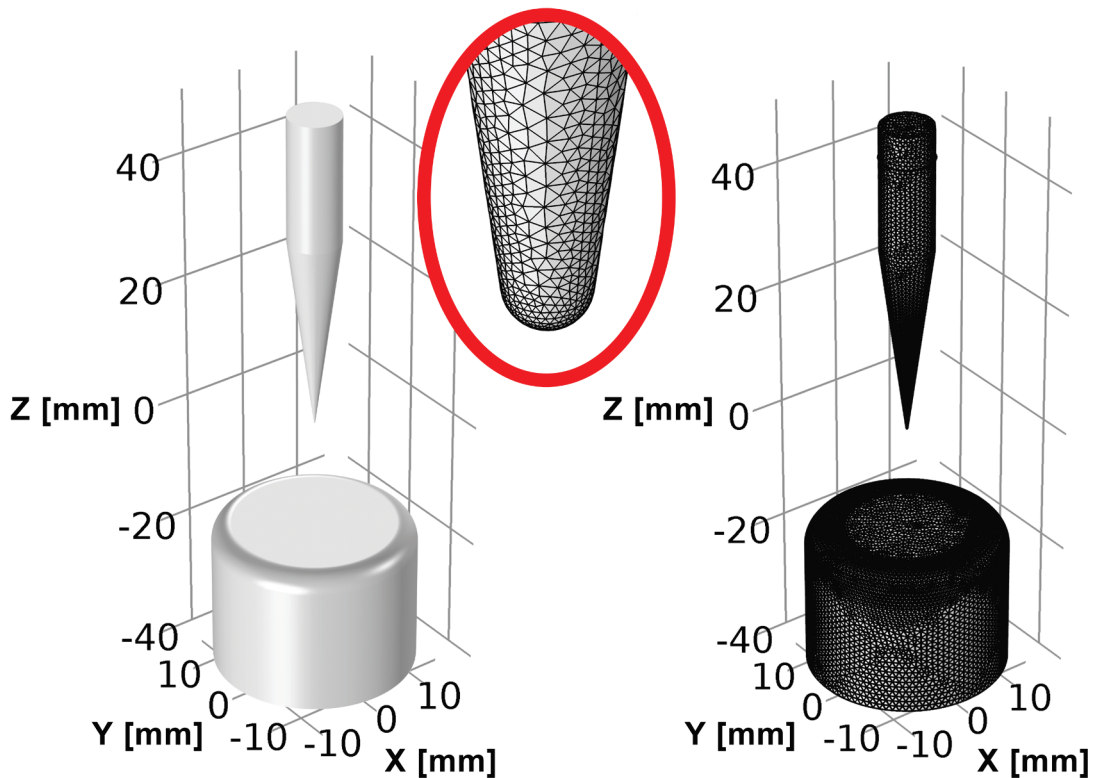
A mesterséges koronakisülés tervezésekor tű-sík elektród pár lett kitűzve célul. Az (1) egyenlet és a 4. ábra alapján a tűhegy csúcsának görbületi sugara határozza meg azt a villamos térerősség értéket, ami felett az ionizáció végbe tud menni. Az elkészítendő tűhegy sugarát a rendelkezésre álló eszközökkel nem lehetett szabályozni, így maga a tű a szimulációkat megelőzően lett elkészítve, majd a görbületi sugar ismeretében lett meghatározva egy, a koronakisülés kialakulásához ideális tű-sík elektródtávolság. Ennek felső határa az a távolság, ahol megjelenik a tűhegy körül az ionizációhoz szükséges térerősség, alsó határa pedig az a közelség, amelynél a teljes elektródközben akkora a villamos térerősség nagysága, hogy a streamer továbbterjedve képes átütést okozni.



13. ábra: Koronakisülés wolfram tűelektródja

A 13. ábrán látható tűelektród egy 4 mm átmérőjű wolfram hegesztő elektród hegyesre köszörülésével készült el. Ez egy igen kemény, nehezen degradálódó anyag, így képes ellenállni a koronakisülésnek, és az esetleges átütésnek a mérések során. Az ábra optikai mikroszkópos részének méretarányai alapján a tűhegy görbületi sugara nagyjából

75 μm -nek tekinthető. Síkelektrodnak egy 30.5 mm átmérőjű, henger alakú rézkupak lett kiválasztva, melynek éle 3 mm görbületi sugarúra lett lekerekítve. Annak érdekében, hogy egyértelműen a tű hegyénél lépjen fel a koronakisülés, a henger elektród megfelelő simaságúra lett csiszolva, majd polírozva. A 14. ábra mutatja a szimulációk során használt modellt, illetve annak hálózott változatát.

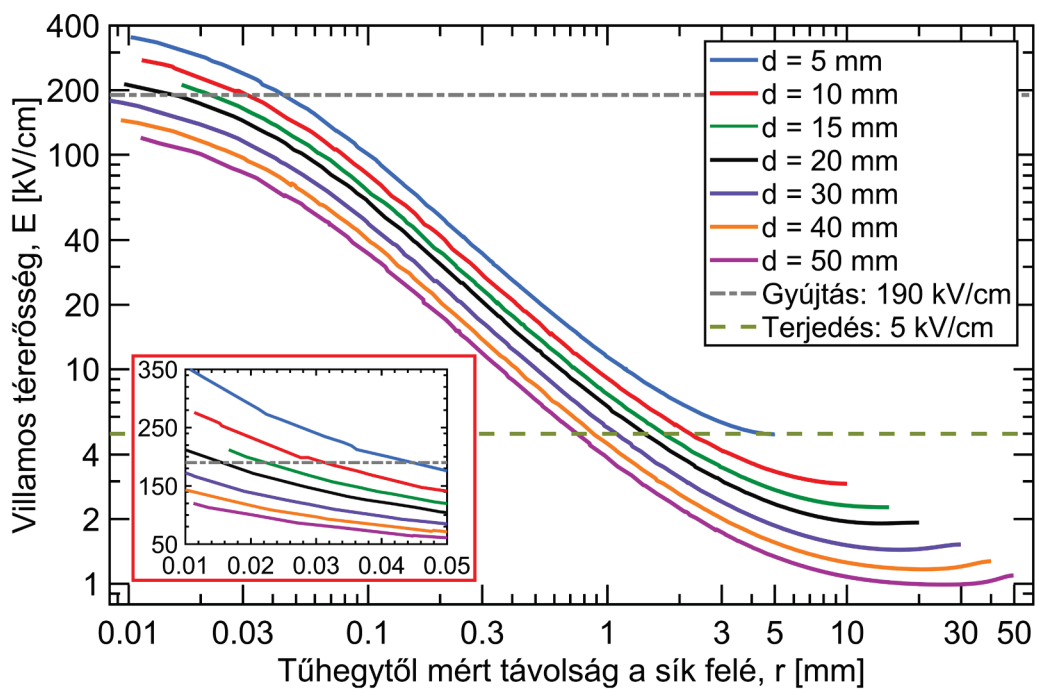


14. ábra: Koronakisülés elektródelrendezésének szimulációs modellje

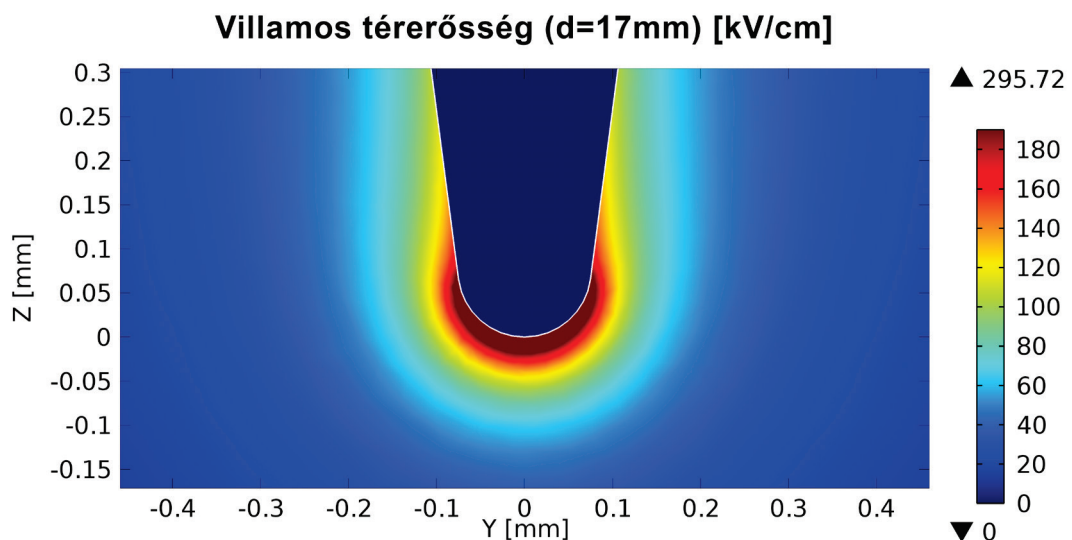
Az (1) egyenlet alapján a 75 μm görbületi sugarú tűelektród esetén a koronakisülés gyújtási térerőssége 190 kV/cm, míg a pozitív streamer továbbterjedéséhez szükséges térerősség a 2.1.2 fejezetben tárgyalt 4 – 6 kV/cm. A 15. ábra bemutatja, hogy a modell d elektródtávolságának változtatásával hogyan alakul a tűhegy és a sík közötti villamos tér, valamint, hogy ennek nagysága hogyan viszonyul a fent ismertetett két határhoz. A szimulációk előtt a hálózás során a választott minimális és maximális elemméret 1 μm , illetve 1 mm volt, a szomszédos elemek egymáshoz viszonyított maximális növekedési rátája pedig 1.3-ra lett beállítva.

A 15. ábra alapján megállapítható, hogy 20 mm-nél kisebb elektródtáv esetén már számítani lehet koronakisülésre, valamint az is látható, hogy 5 mm-nél nagyobb távolság esetén nem teljesül a teljes elektródközben a pozitív streamer terjedésére vonatkozó

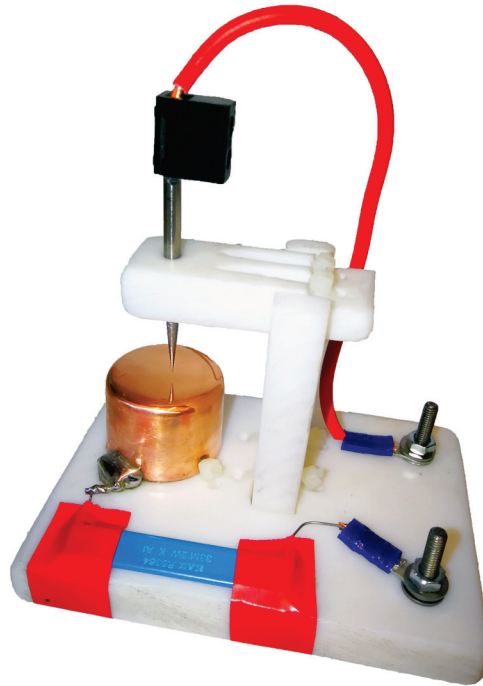
térféregység feltétel, így ebben a tartományban nem várható átütés. Ezzel szemben az 5 mm-es esetben még a síkelektrod felületén is pont jelen van a kritikus 5 kV/cm értékű térféregység, így ebben az elrendezésben már igen valószínű az átütés létrejötte. A kapott eredményeket figyelembe véve, az elrendezés 17 mm és 5 mm elektrod távolságok mellett került tesztelésre, a koronakisülés korai, valamint átütésbe váltó szakaszainak vizsgálatára. A 17 mm-es elrendezés szimulációs eredménye a 16. ábrán, míg a fenti távolságok figyelembevételével megépített koronakisülés forrás a 17. ábrán látható.



15. ábra: Tű-sík modell villamos tere a két elektrod között, változó távolság esetén



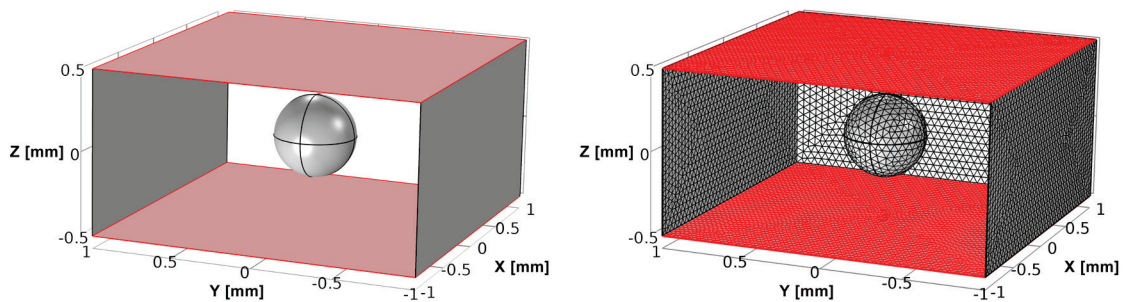
16. ábra: Tűelektrod villamos térféregzlása 17 mm elektrod távolság esetén



17. ábra: A szimulációk alapján megépített koronakisülés forrás

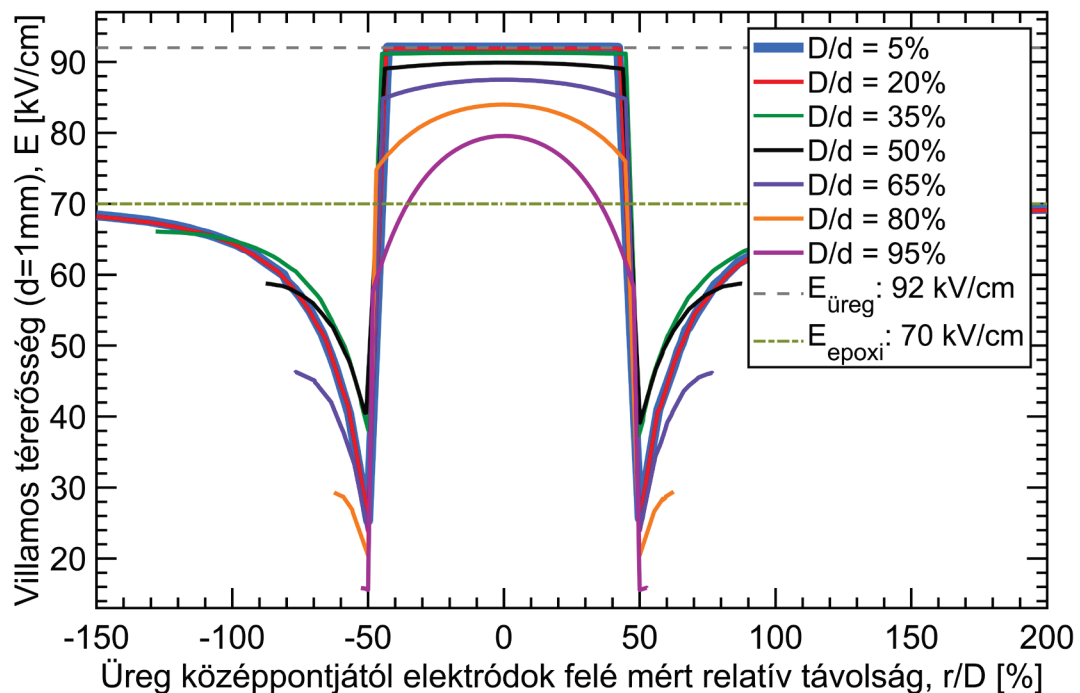
3.3 Üregkisülés forrásának építése

Az üregkisülést adott vastagságú epoxi rétegbe helyezett légbuborékkal lehet létrehozni. Ehhez előzetesen meg kell vizsgálni, hogy melyik az az ideális d epoxi vastagság (elektródtávolság) és D légbuborék átmérő kombináció, melyet a rendelkezésre álló öntési technológiával még könnyű megvalósítani, valamint teljesül a buborék villamos terére a (3) egyenlet és az 5. ábra által bemutatott gyújtási kritérium. Ehhez a 18. ábrán látható elrendezés buborék átmérő (D) és epoxi vastagság (d) paramétereinek változtatásával szimulációk lettek elvégezve különféle D/d arányokra. A szimulációk előtt a hálózás során a választott minimális és maximális elemméret $0.1 \mu\text{m}$, illetve $50 \mu\text{m}$ volt, a szomszédos elemek egymáshoz viszonyított maximális növekedési rátája pedig 1.2-re lett beállítva.



18. ábra: Üregkisülés szimulációs modellje

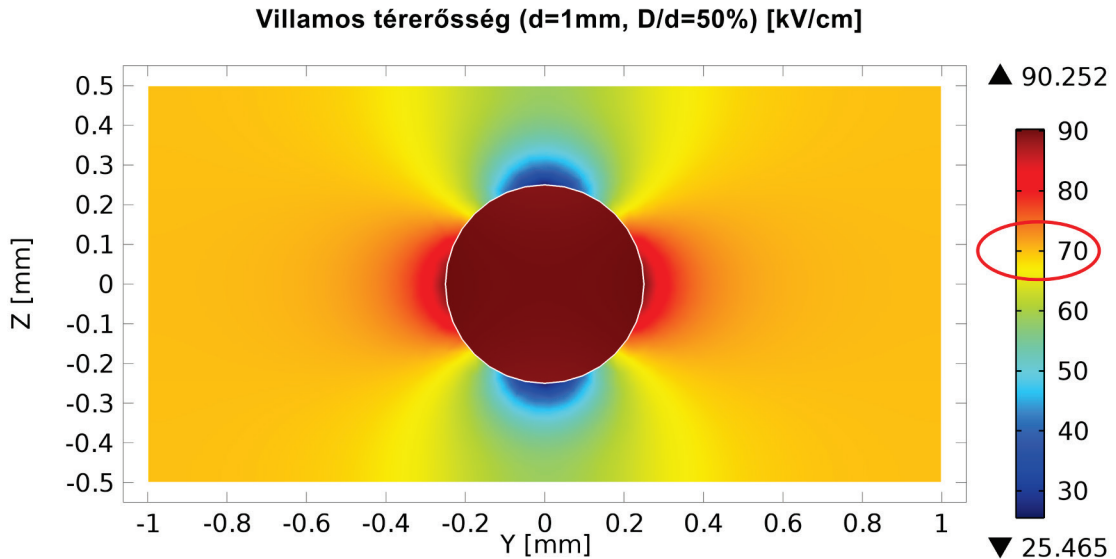
A szimulációkból kinyert releváns adat a villamos térerősség alakulásának görbéje a két elektród között a buborékon keresztülhaladva. Ezek a görbék a 19. ábrán összehasonlításra kerültek az epoxi külső villamos terének ideális E_{epoxi} értékével, valamint az üreg belsejében ideálisan létrejövő homogén $E_{\text{üreg}}$ térerősség értékkel. Az előbbit az $E_{\text{epoxi}} = U/d$ összefüggéssel lehet kiszámítani, ahol $U = 7 \text{ kV}$, valamint a 19. ábra esetében $d = 1 \text{ mm}$, így ebből az $E_{\text{epoxi}} = 70 \text{ kV/cm}$ érték adódik. Az üreg térerőssége a (2) egyenlet szerint, a 2.2.3 fejezetben meghatározott $\epsilon_r = 3.545$ relatív permittivitással számolva $E_{\text{üreg}} = 92 \text{ kV/cm}$ értékűre adódott. Mivel a fenti összefüggések alapján E_{epoxi} arányos a d távolsággal, $E_{\text{üreg}}$ pedig arányos az epoxi homogén terével, így elég azt vizsgálni, hogy változatlan d távolság mellett a fenti összefüggések mely D/d arányokra helytállóak. Amennyiben pontosak a számítással kapott közelítések, úgy a megvalósítandó minta d és D paramétereinek meghatározásához elegendő a fenti összefüggések eredményeinek összevetése a (3) egyenlet alapján számított gyújtási térerősség értékével.



19. ábra: Buborék villamos tere normalizált buborékméret és változó D/d arány esetén ($d=1\text{mm}$)

A fenti ábrán az elektródok távolsága $d = 1 \text{ mm}$ -re lett rögzítve, így a D/d arányt a D üreg átmérő változtatásával lehetett elérni. Az áttekinthető ábrázolás és a különböző buborékméretetek téreloszlásának vizsgálhatósága érdekében ez a D átmérő minden görbe esetén normalizálva lett, így a vízszintes tengelyen a buborék középpontjától mért

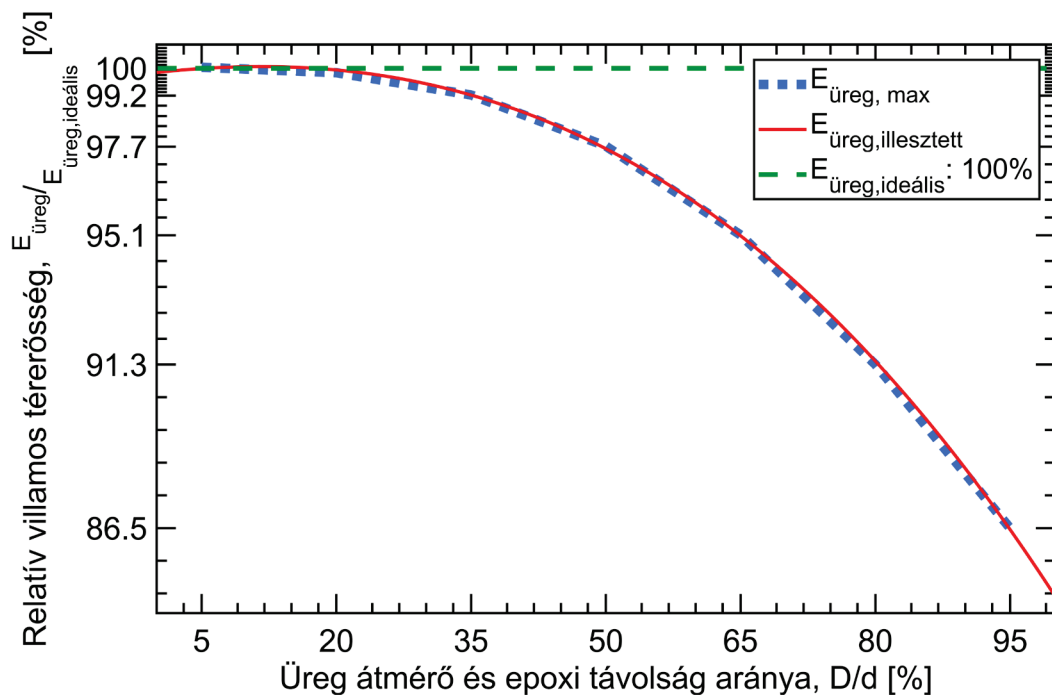
távolság D-hez viszonyított értéke szerepel százalékban. Az ábra nagyobb D/d arányú görbéinél a buborékon kívül a várt $E_{\text{epoxi}} = 70 \text{ kV/cm}$ értéknél sokkal kisebb értékek tapasztalhatók, azonban ahogy az a 20. ábra szimulációs téreloszlásából is látható, a buborékon kívüli oldalsó térrészben a vártnak megfelelő térerősség van jelen.



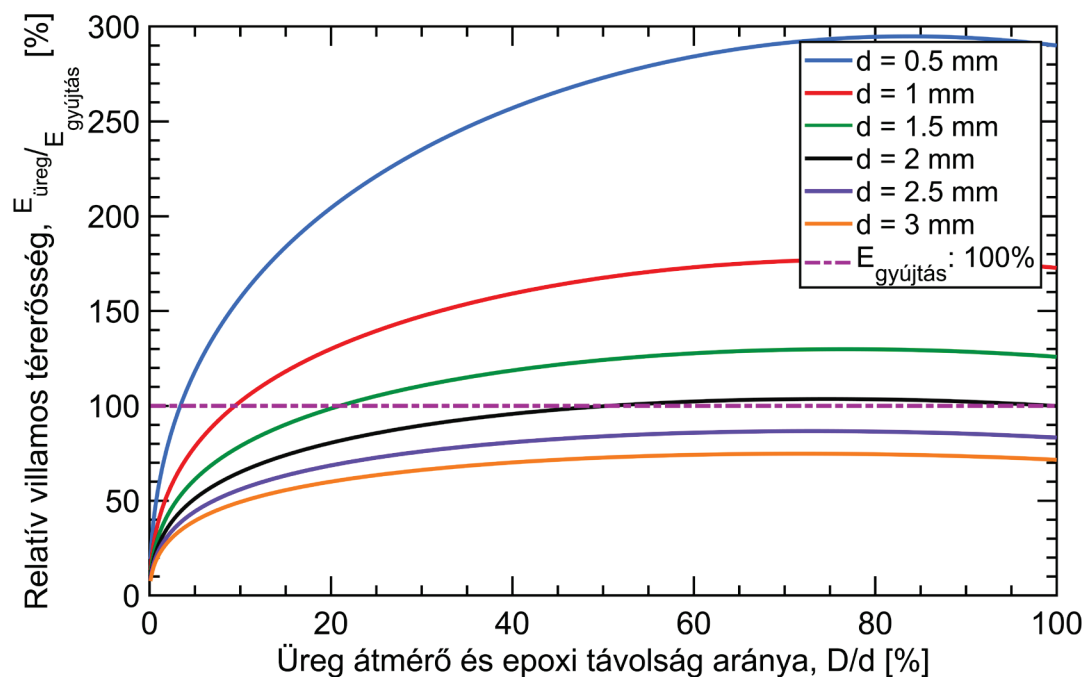
20. ábra: Buborék modell villamos téreloszlása 1 mm epoxi vastagság és 50% D/d arány esetén

A 19. ábra további vizsgálatával az is belátható, hogy a buborék belsejében valóban közel homogén a villamos tér, értéke azonban csak kisebb D/d arányok esetén felel meg a (2) egyenlet által számított értéknek. Az ábra görbéinek maximum értékeit mutatja a D/d arány függvényében a 21. ábra, a (2) egyenlet ideális értékéhez viszonyítva. A maximális térerősség értékekre egy harmadfokú polinomiális görbe is illesztve lett. A korábban leírt egyenes arányosságok miatt ez az ábra már általánosan mutatja be, hogy adott D/d arány esetén a számított ideális térerősség hány %-a érhető el maximálisan az adott üregben. Az illesztett görbe egyenletét, valamint a korábban tárgyalt összefüggéseket összeolvasztva, a (7) egyenlőtlenség fejezi ki az üregkiszülés módosított gyújtási kritériumát, adott d elektródtávolság, D légüreg átmérő, ϵ_r dielektrikum relatív permittivitás és U feszültség esetén. Alább d és D mm-ben, U pedig kV-ban értendő. Az egyenlőtlenség két oldala kV/cm mértékegységű. A 22. ábra ezen egyenlőtlenség bal és jobb oldalának hányadosát adja meg százalékosan, a D/d arány függvényében, különböző d távolságok esetén.

$$\frac{U}{d} \cdot \frac{3\epsilon_r}{1+2\epsilon_r} \cdot \left(-0.705 \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^3 - 1.123 \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 + 0.290 \cdot \frac{D}{d} + 9.988 \right) > 24.2 \cdot \left(1 + \frac{8.6}{\sqrt{D \cdot 100}} \right) \quad (7)$$



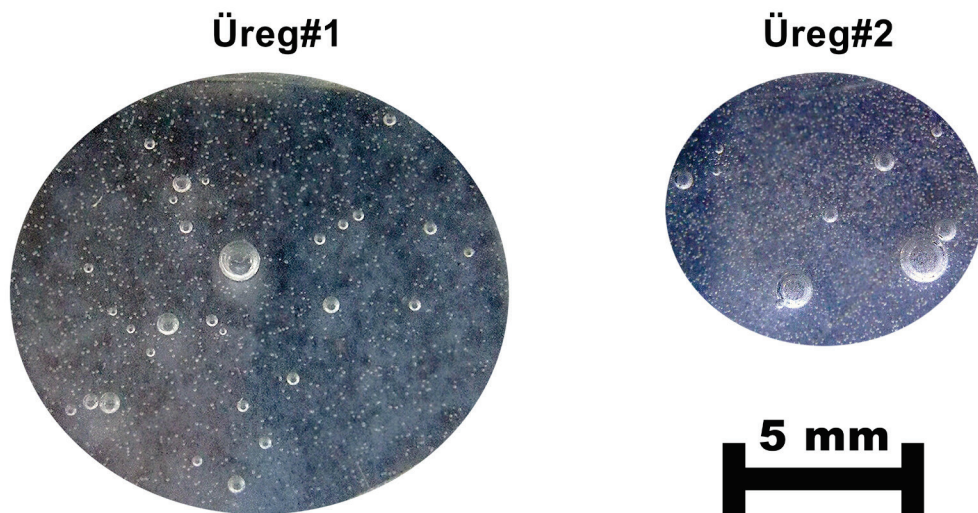
21. ábra: Üreg maximális télerőssége D/d függvényében az ideális értékhez viszonyítva



22. ábra: Üreg relatív villamos tere a gyűjtési télerősséghez viszonyítva, d és D/d függvényében

A 22. ábra alapján látható, hogy 0.5, 1 vagy 1.5 mm vastag epoxi réteget kell használni a gyűjtési kritérium teljesüléséhez. A rendelkezésre álló eszközökkel a vékonyabb epoxi rétegek elkészítése komoly nehézségeket vetett volna fel, így a választás a $d = 1.5$ mm-es vastagságra esett, melyre 20%-nál nagyobb D/d arányok esetén már

egyértelműen teljesül a gyújtási kritérium. Ennek megfelelően az 5 órás fazékidő végéhez érve, amikor az epoxi már kellően viszkózus a buborékok magában tartásához, 1.5 mm vastag epoxi rétegek lettek lapos öntőformákba öntve, majd addig lettek keverve, míg a buborékok mérete megfelelő nagyságrendbe nem került. A kikeményedést követően kiválasztásra került két buborékcsoport, melyek ki lettek vágva a kikeményedett epoxi lapból. Ezt követően a két minta be lett helyezve két azonos méretű réz elektród közé, majd körbe lett öntve epoxigyantával. A gyantába öntésre a nagy térerősségű hármastalálkozási pont, és ezen keresztül az esetlegesen fellépő felületi kisülés elkerülése miatt volt szükség. A réz hengerek a koronakisülés síkelektrodjához hasonló elrendezésű rézkupakokból lettek elkészítve csiszolással és polírozással. Az elektródok külső átmérője 20 mm, lekerekített élük görbületi sugara pedig 2.5 mm volt. A buborékot tartalmazó epoxi minták végső öntés előtti állapotát mutatja a 23. ábra.

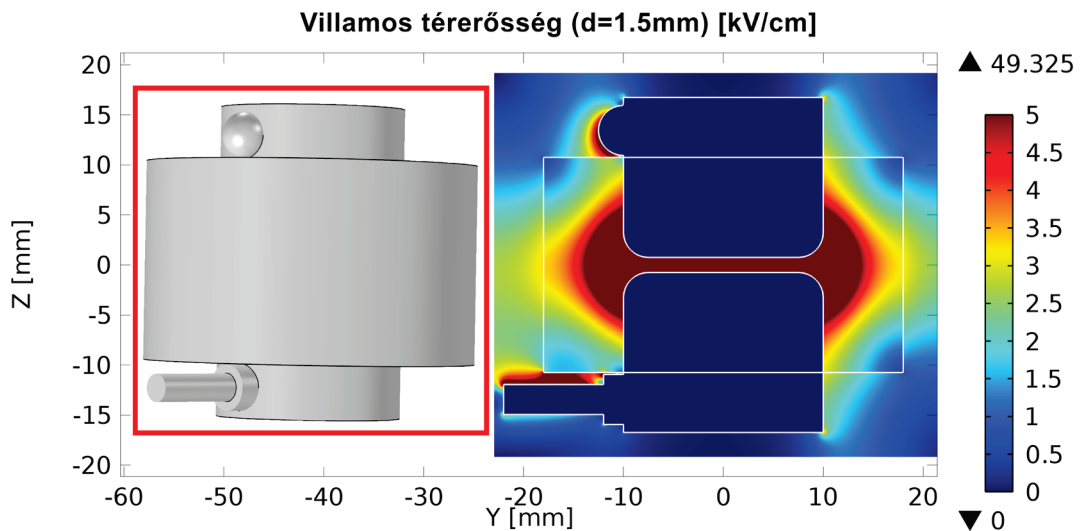


23. ábra: #1 és #2 számú üregkisülés minta légbuborékos epoxi rétegei

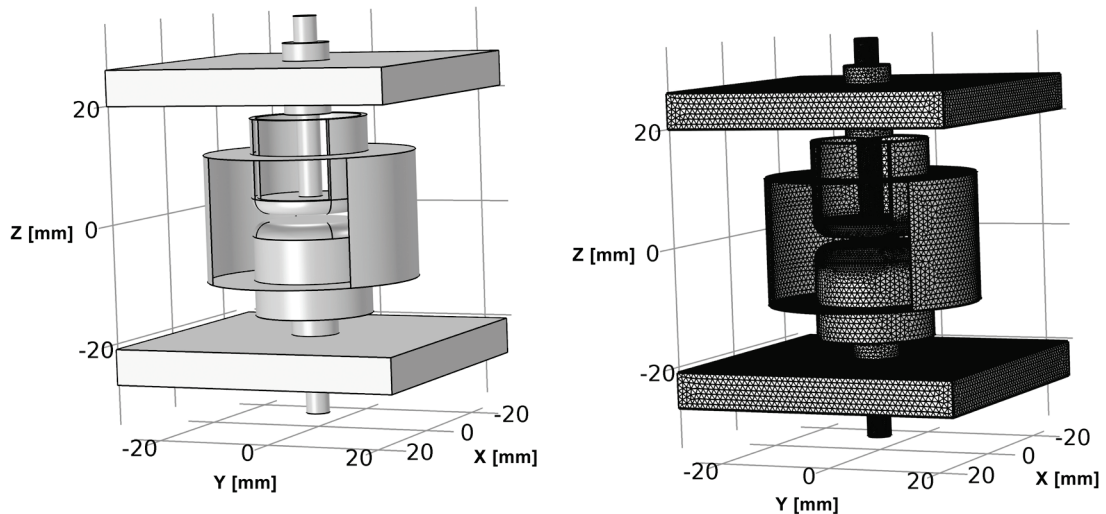
Az ábrán látható buborékok az Üreg#1 minta esetén nagyságrendileg 0.1 – 0.7 mm nagyságúak, míg az Üreg#2 mintánál ez a tartomány 0.4 – 1.2 mm. A nagyobb buborékok mindkét esetben a (7) gyújtási kritérium és a 22. ábra alapján meghatározott 20%-os D/d arány fölött helyezkednek el, így várható az üregkisülés kialakulása. Megfigyelhető továbbá, hogy a legnagyobb buborék sem lépi túl a 80%-os D/d arányt, így a villamos tér buborékon belüli inhomogenitása sem okoz komolyabb bizonytalanságot a kisülés kialakulása terén.

A minták elkészültével a villamos hozzáférések az eredeti tervek szerint a hengerek falába oldalról csatlakozó csavarokkal lettek volna megoldva, azonban ennek a

23. ábrán is látható előzetes szimulációja kimutatta, hogy a csavarok és az epoxi felületének közelsége miatt a lokális térerősség akkora, hogy fennáll az esetleges nemkívánt felületi kisülés veszélye. Az ábrán a színskála maximuma a streamer terjedési kritériumára alapozva 5 kV/cm-re lett beállítva.



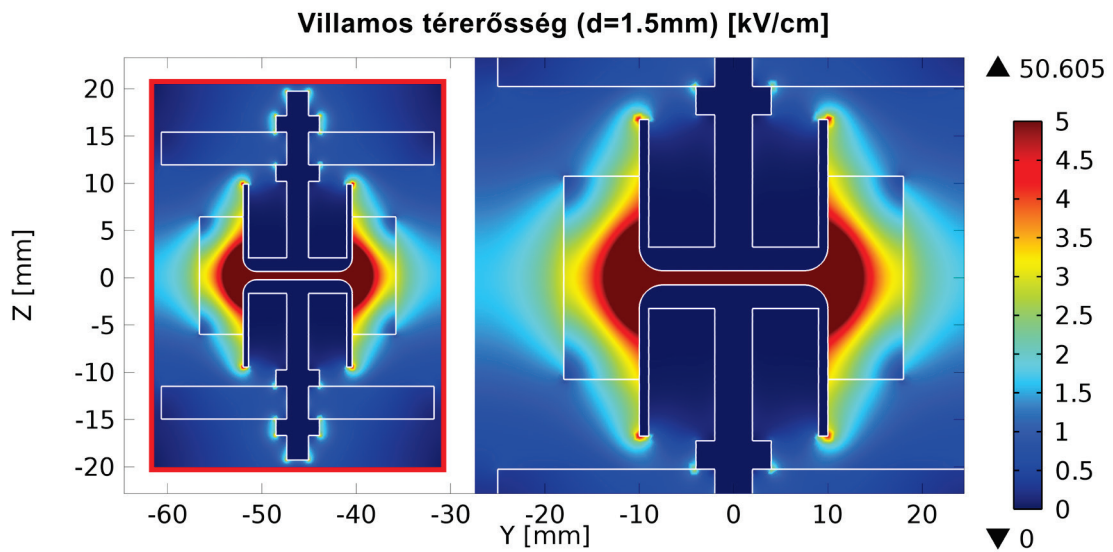
24. ábra: Üregkisülés forrás oldalsó csavaros hozzávetésének modellje és szimulációja (d=1.5mm)



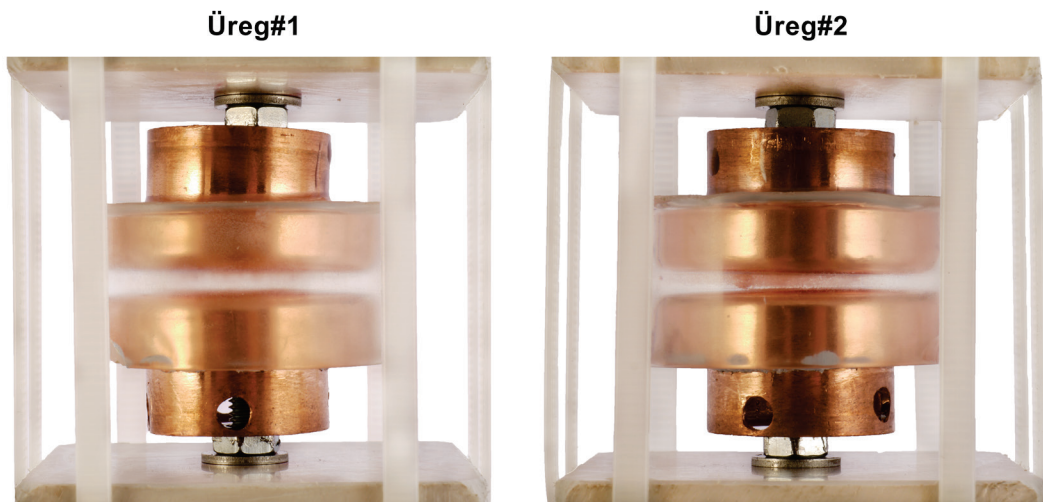
25. ábra: Üregkisülés forrás függőleges csavaros hozzávetésének modellje (d=1.5mm)

A hozzávetések újratervezése során a csavarok függőlegesen lettek hozzászorítva az üreges elektródok belső felületéhez, ahogy azt a 25. ábra is mutatja. A csavarok térbeli rögzítéséért egy-egy 50 x 50 x 6 mm-es műanyag lap felelt, melyek relatív permittivitása 2.56-nak adódott az epoxiéhoz hasonló kapacitásmérés alapján. A

26. ábra szimulációs eredményei szerint az epoxin kívüli térrészben nincs kritikus térerősségű pont, így az elrendezés megépíthető. A kész mintákat a 27. ábra szemlélteti.



26. ábra: Üregkisülés forrás függőleges csavaros hozzávetésének szimulációja (d=1.5mm)

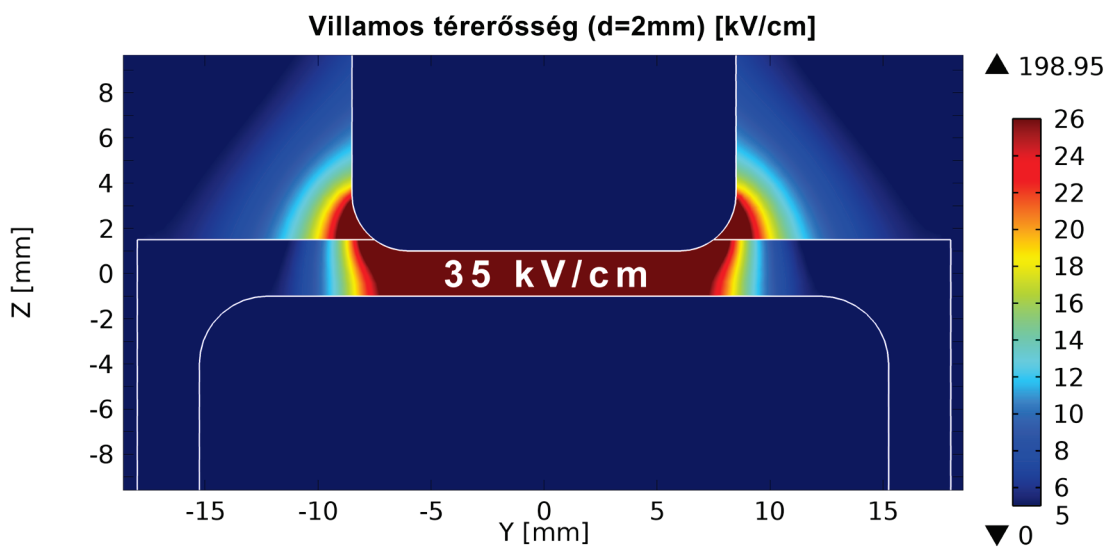


27. ábra: A szimulációk alapján megépített üregkisülés források

3.4 Felületi kisülés forrásának építése

A felületi kisülés modellezése esetén nem álltak rendelkezésre az előző két típushoz hasonló összefüggések, melyek eredményeihez viszonyítani lehetett a kialakuló villamos teret. Ennek fő oka, hogy míg az előző két típus esetére létezik általánosnak tekintett alapvető elrendezés, addig a felületi kisülés rengeteg féle elektród elrendezéssel létrehozható, melyeknél a geometria minden esetben befolyásolja a kisülés létrejöttének kritériumait. A kutatás során két különböző átmérőjű, a korábbiakhoz hasonló henger

alakú réz elektród között alakult ki a villamos tér. A nagyobb átmérőjű alsó elektród a koronakisülés alsó elektródjával azonosan 30.5 mm külső átmérőjű volt, 3 mm görbületi sugarú éllel, míg a felső elektród ezen értékei 17 mm, valamint 2.5 mm voltak. A felületi kisülés kialakításához az alsó elektród csaknem teljes egészében epoxiba volt süllyesztve, ezt követte d vastagságú epoxi réteg, majd a felső elektród, melynek élénél jött létre a felületi kisülés szempontjából kritikus hármastalálkozási pont. Annak érdekében, hogy a felületek egyenetlensége következtében a felső elektród és az epoxi találkozási felülete mentén ne alakuljanak ki nemkívánt részakisülések, a felső elektród vékony epoxi réteggel lett hozzá ragasztva az elrendezés másik feléhez.

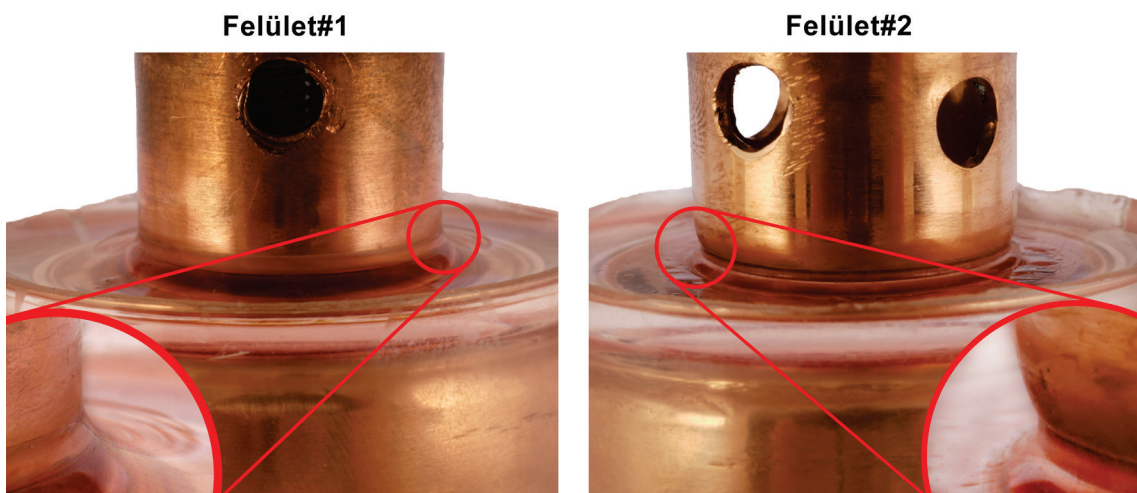


28. ábra: Felületi kisülés kiindulási modelljének téreloszlása ($d=2\text{mm}$)

A kiindulási modell esetében a d távolság 2 mm-nek lett választva, a felső elektród pedig a ragasztás következtében 0.5 mm-re lett az epoxiba süllyedve. Ilyen lekerekítettségű elrendezéseknél a felületi kisülés kialakulásában a térerősség abszolút értéke dominál, így a 28. ábra szimulációs eredményén is ennek eloszlása szerepel. Ennél az elrendezésnél a streamer a hármastalálkozási pont melletti légrésben történő átütéssel indul meg. Az ehhez szükséges villamos tér a streamer bemutatásánál tárgyaltak alapján 26 kV/cm-nek tekinthető, míg a továbbterjedés feltételét továbbra is 5 kV/cm-nek tekintjük. Az elrendezésnél tehát azt kell vizsgálni, hogy a találkozási pont körül rendelkezésre áll-e az előbbi érték, illetve, hogy a két elektródot összekötő kúszófelület mentén a térerősség 5 kV/cm alá csökken-e, ellenkező esetben ugyanis fennáll a felület mentén történő átívelés veszélye. Az ábrán jól látható, hogy a görbület mentén a teljes

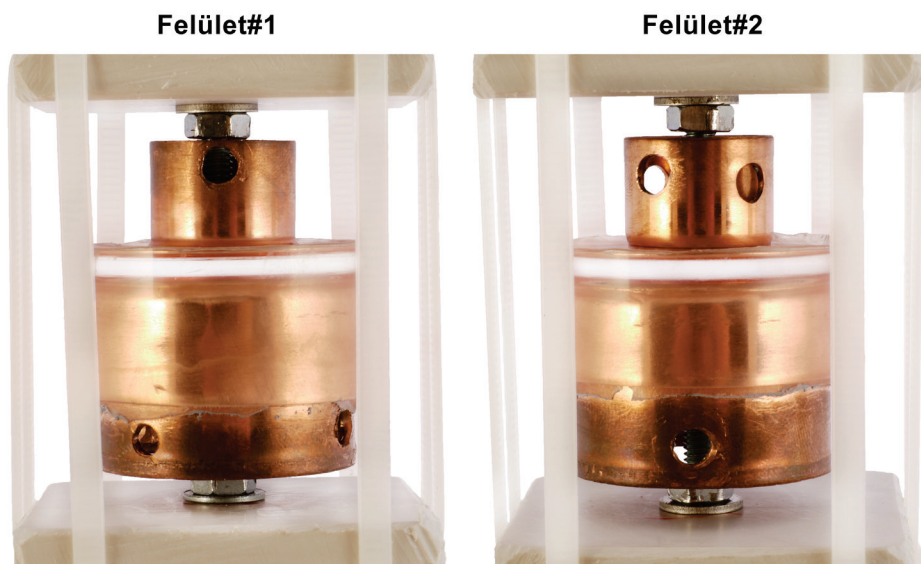
légrésben teljesül a streamer kialakulásának a feltétele, továbbá eltávolodva a találkozási ponttól a térerősség nagysága viszonylag kis távolság után lecsökken 5 kV/cm alá.

Ennek megfelelően elkészítésre került az első (Felület#1) minta a megadott paraméterekkel, azonban a kikeményedést követő szemrevételezés során a 29. ábra bal oldalán látható rendellenesség volt megfigyelhető. Az epoxi az öntés után felfutott a felső elektród görbületére, teljesen belepve a kritikus légrést. Következő lépésként, a hiba javítását célul kitűzve egy újabb elrendezés kerül megépítésre (Felület#2), melynél az elektródtávolság 1.5 mm -re lett választva, a felső elektród esetén pedig nem volt cél az epoxiba süllyedés, csupán egy minimális mennyiségű gyanta került felvitelre a találkozási felületekre. A hármas találkozási pont ebben az esetben a 29. ábra jobb oldala szerint alakult. A teljes elektródelrendezéseket a 30. ábra mutatja, melyen a hozzávezetések a hengerszimmetria megőrzése érdekében az üregkisülés mintáihoz hasonlóan lettek megoldva.

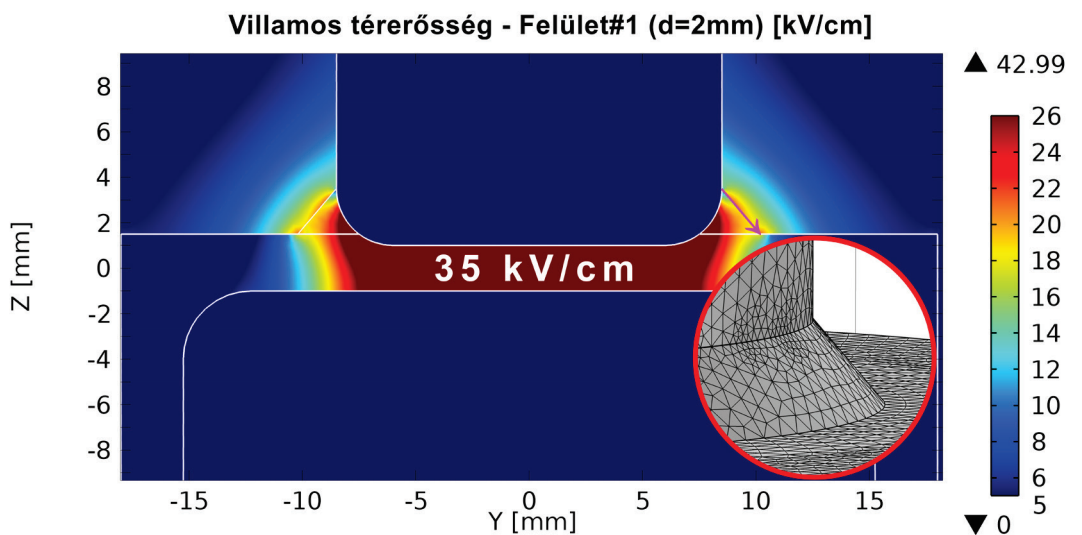


29. ábra: Felület#1 és Felület#2 elektródelrendezések hármas találkozási pontjai

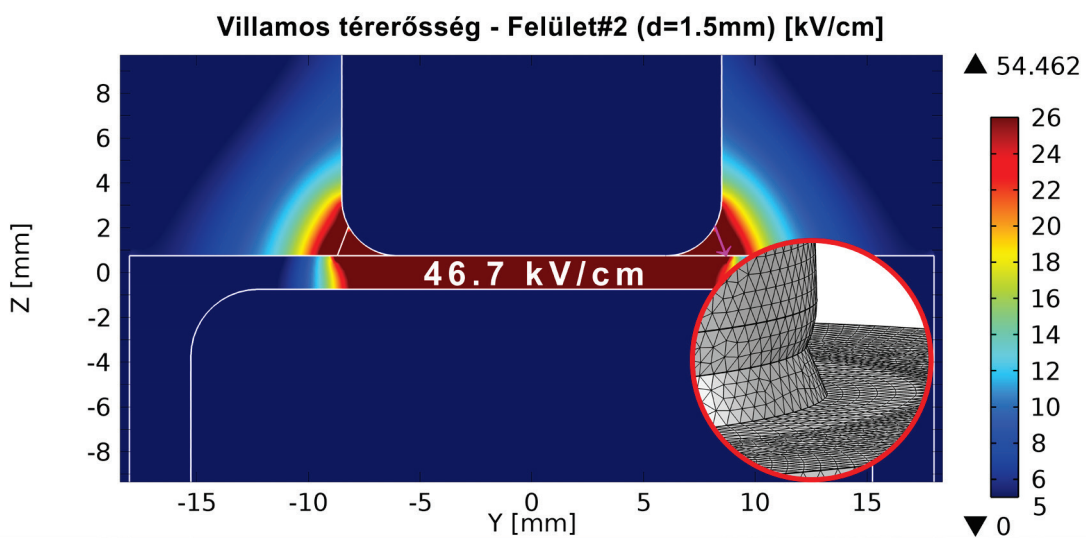
A szemrevételezés alapján a 28. ábra modellje módosítva lett a két elrendezés hármas találkozási pontjainak megfelelően. Az új modellek villamos téreloszlásának szimulációit mutatja a 31. ábra és a 32. ábra. Mivel az eredeti találkozási pont mindkét esetben az epoxiba süllyedt, így az új találkozásnál az epoxi felületén jelentősen kisebb villamos térerősség tapasztalható. Ennek részletesebb vizsgálatához a felfutott epoxi felülete mentén, a felső elektród hármas találkozási pontjától távolodva is meg lett vizsgálva a villamos térerősség alakulása, melyet a szimulációs ábrákon a magenta színű nyíl jelez. A nyilak mentén kiértékelt térerősséget ábrázolják a 33. ábra görbéi, összehasonlítva a streamer elvi 26 kV/cm értékű gyújtási térerősségével.



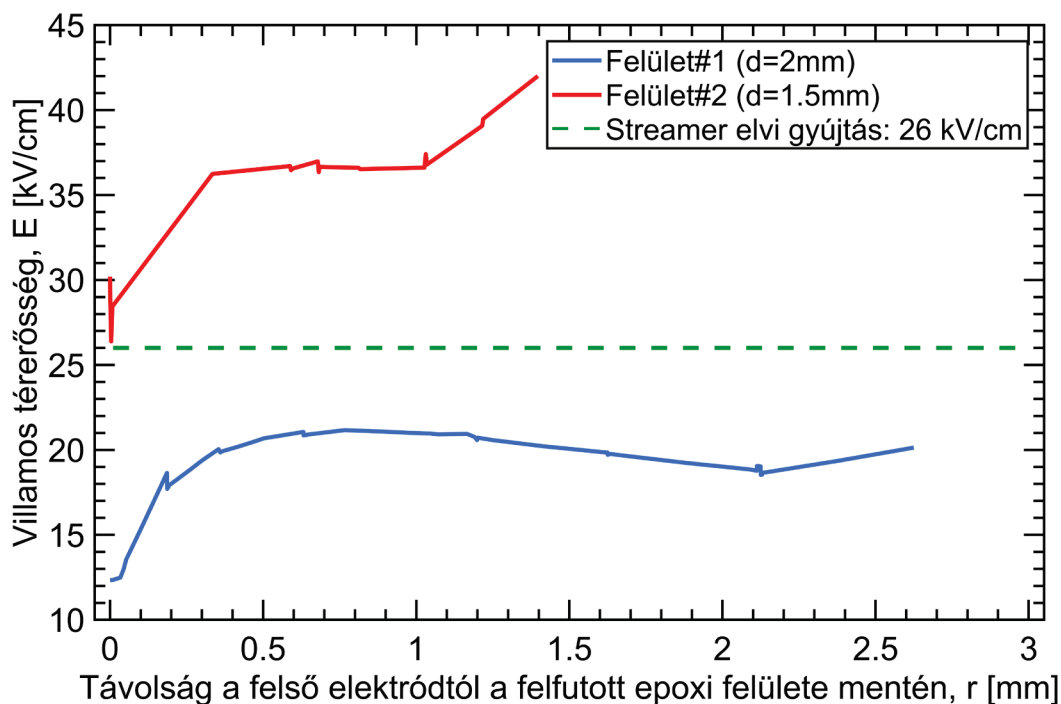
30. ábra: A kiindulási szimuláció alapján megépített felületi kisülés források



31. ábra: Felület#1 elektródelrendezés szimulációs villamos téreloszlása (d=2mm)



32. ábra: Felület#2 elektródelrendezés szimulációs villamos téreloszlása (d=1.5mm)



33. ábra: Felületi elrendezések villamos tere a hármas találkozási pontból kiindulva

A 33. ábra görbéiből megállapítható, hogy a Felület#2 elrendezés esetén a streamer elvi gyújtási télerősség értékére támaszkodva is várható a felületi kisülés kialakulása. Ezzel szemben a Felület#1 mintánál az epoxi felületén a télerősség maximuma is csupán 20 kV/cm körüli értékű. Itt azonban hangsúlyozandó, hogy a viszonyítási alapként használt streamer gyújtási télerősség tisztán gázzal kitöltött elektródközre lett bevezetve, továbbá szó volt arról is, hogy szilárd szigetelőanyag határfelületén a villamos szilárdság sokkal kisebb, mint tisztán gáz belsejében. Ebből arra következtethetünk, hogy az #1 minta 20 kV/cm körüli télerősség értéke esetén is számíthatunk felületi kisülés kialakulására. Ez az érték ugyanis több, mint 75 százaléka a tisztán levegőre vonatkozó gyújtási télerősségnek, az irodalom pedig a két eset összehasonlításakor ennél sokkal jelentősebb eltérésekről számol be.

4 Részkisülés források tesztelése

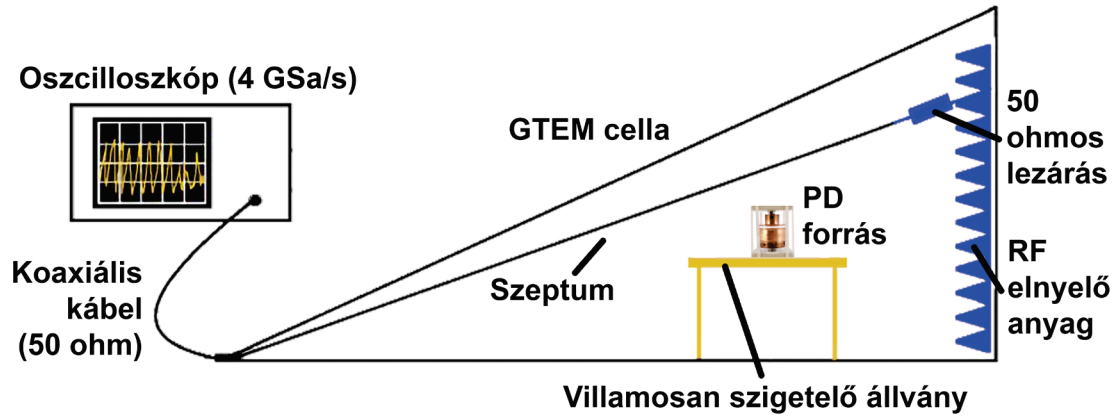
4.1 Mérési elrendezés

4.1.1 GTEM cella [18]

Az elkészített részkisülés források elsugárzott elektromágneses jeleinek közvetlen vizsgálatára a legalkalmasabb eszköz az úgynevezett GTEM cella (Gigahertz Transverse ElectroMagnetic cell). Ez egy elektromágneses szempontból árnyékolt berendezés, melynek alapvető működési sajátossága, hogy a belsejében keltett elektromágneses hullámot képes a kimenetére csatlakoztatott koaxiális kábelbe annak 50 Ω -os meghosszabbításaként továbbvezetni.

A cella fala valamilyen vezető anyagból, jellemzően fémből készül téglalap alapú üreges piramis alakban, mely használata során jellemzően oldalára van fektetve. A cella alapja rádiófrekvenciás elektromágneses sugárzást elnyelő (RAM - Radiation-Absorbent Material) anyaggal van kibélelve, míg a piramis négy oldala hullámvezetési céllal csupaszon van hagyva. A cella közepén van felfüggesztve a szeptumnak (septum - válaszfal) nevezett vezető lemez, melynek az alap felőli vége egy 50 Ω -os terhelésen keresztül a cella falához van kötve. Ez a terhelés sok esetben maga a rezisztív anyagú RAM bélése a cella alapjának. A piramis belső geometriájának és az abszorbens alapnak köszönhetően nem tudnak sem reflexiók, sem állóhullámok kialakulni a cellában, így a belsejében keltett elektromágneses jel tisztán haladó hullámként éri el a piramis csúcsát, ahova a kimenő koaxiális kábel csatlakozik. A cella tehát a rá csatlakozó koaxiális kábel 50 Ω -os lezárású meghosszabbításaként funkcionál, melynek külső vezetője a cella fala, központi vezetője pedig a szeptum. Ez olyan, mintha a vizsgálandó jelet már eleve a kábelben hoznánk létre, így azt torzításmentesen kapjuk vissza.

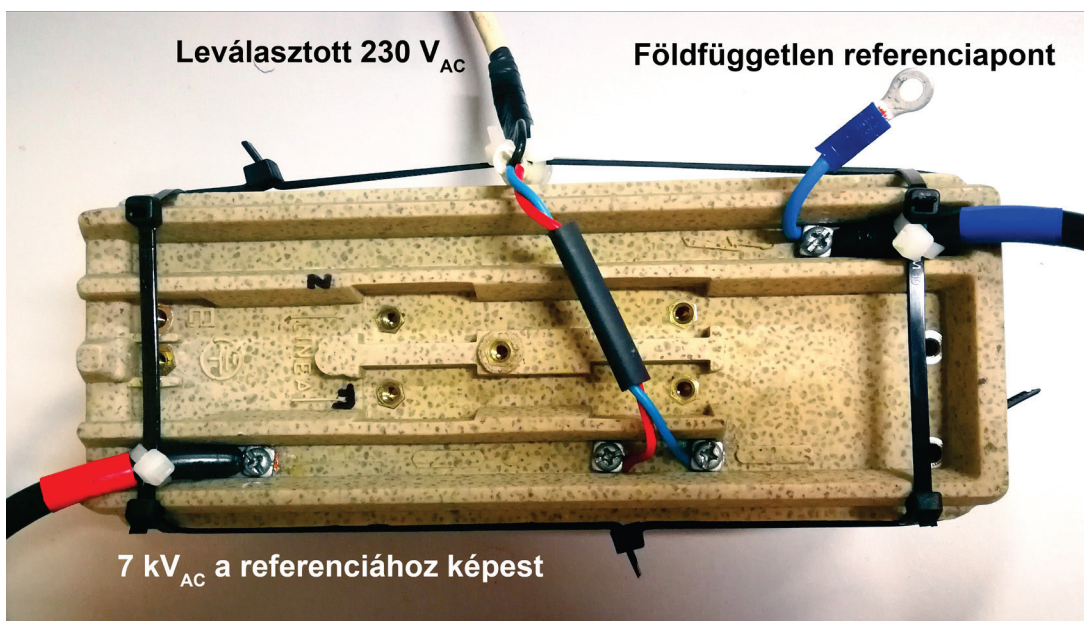
A BME Villamos Energetika Tanszékén található berendezés a 9 kHz és 5 GHz közötti frekvenciasávban alkalmazható, mely a részkisülés jelének vizsgálatára tökéletesen alkalmas. A cella sematikus rajzát a 34. ábra mutatja.



34. ábra: GTEM cella sematikus felépítése [18]

4.1.2 Feszültségforrás, részkiülés források és adatrögzítés

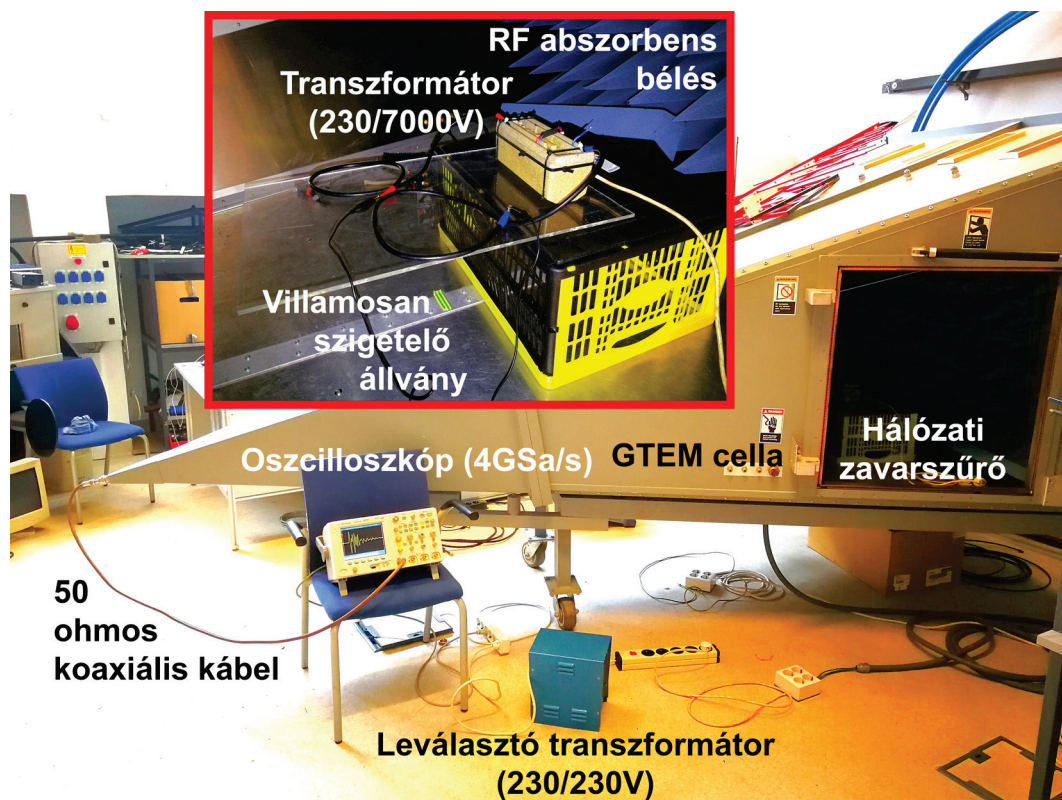
A mintákra kapcsolt feszültséget a 35. ábrán látható $230\text{ V}_{AC} / 7000\text{ V}_{AC}$ áttételű transzformátor szolgáltatja, mely a mérések során a cellában helyezkedett el. A transzformátort tápláló 230 V váltakozó feszültséget egy leválasztó transzformátor szolgáltatja, mely még a GTEM cella házába épített hálózati zavarcsűrőn is keresztül haladt, mire bejutott a cella mérőterébe. Erre azért van szükség, hogy a külső vezetett zajok ne juthassanak be a cellába, esetlegesen elnyomva ezzel a mérési eredményeket. A transzformátor a cellán belül egy villamosan szigetelő állványra lett felhelyezve, hogy annak földpotenciálon levő házatól a nagyfeszültség minden irányban a lehető legnagyobb távolságra legyen, kiküszöbölve ezzel a nemkívánt részleges kisülések kialakulását.



35. ábra: A nagyfeszültség előállítására használt transzformátor

A mérések során a dolgozat előző szakaszában prezentált 5 forrás került tesztelésre, melyek továbbiakban alkalmazott elnevezései: Korona, Üreg#1, Üreg#2, Felület#1, Felület#2. A nagyfeszültség és a tesztelt forrás közé minden esetben sorosan be volt kötve egy 30 M Ω értékű ellenállás a kisülés áramimpulzusainak csökkentésére. Erre azért volt szükség, hogy a nagyfeszültségű hozzávezetések ne sugározzák maguk is antennaként a részkisülés jelét. A sorosan bekötött ellenállás nélkül ugyanis a hozzávezetés karakterisztikája dominánsan befolyásolná a mért jel spektrumát, eltorzítva ezzel az eredeti részkisülés impulzus frekvenciatartománybeli képét.

A cella kimenete egy 50 Ω -os koaxiális kábelen keresztül volt az adatrögzítésért felelős, 4 GSa/s mintavételi frekvenciájú, 500 MHz sávszélességű digitális oszcilloszkópra kötve. A teljes mérési elrendezést a 36. ábra mutatja.



36. ábra: Mérési elrendezés a mesterséges részkisülés források tesztelésére

4.2 Mérési eredmények

4.2.1 Részkisülések PRPD ábrái [19] [20] [21] [22] [23]

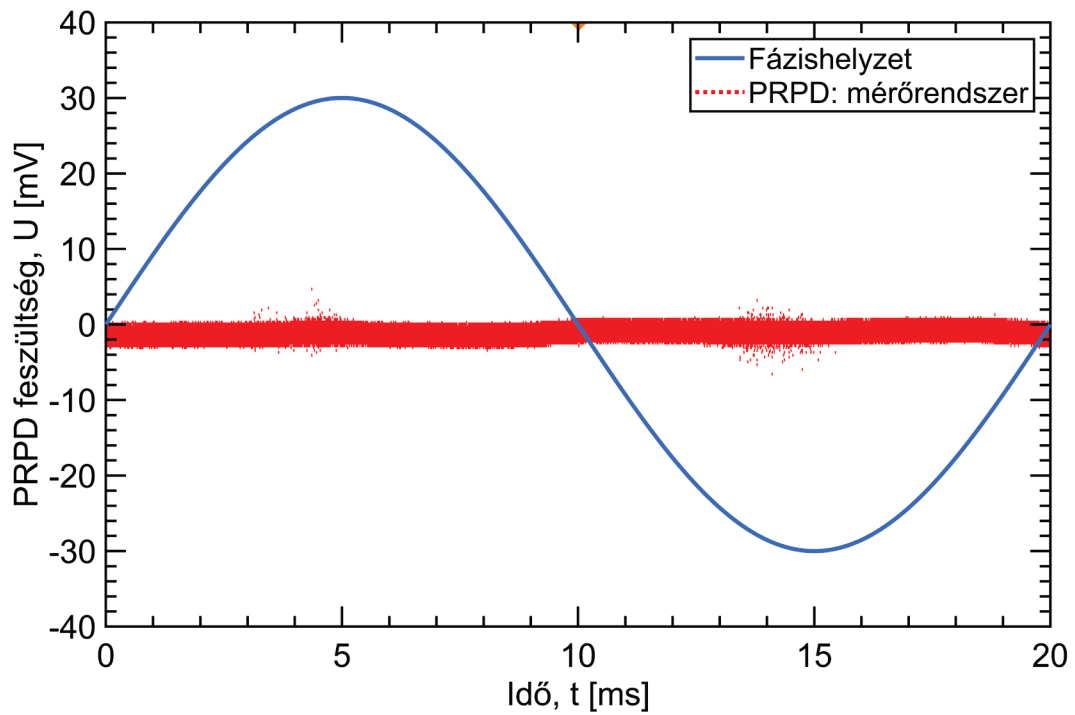
A részkisülések vizsgálatára szemléletes módszer a PRPD (Phase-Resolved Partial Discharge) diagramok alkalmazása, melyek a részkisülés aktivitást mutatják az 50 Hz-es tápfeszültség fázishelyzetének a függvényében. Ezeket a diagramokat jellemzően a részkisülés jelének vezetett mérése során alkalmazzák a konvencionális mérések során, így függőleges tengelyén a részkisülés intenzitását pC-ban szokás megadni. Ez a töltés érték a részkisülés áramimpulzusának integrálásával adódik, erre azonban a sugárzott jel mérése során nem volt lehetőség, így a továbbiakban prezentált ábrák a mért feszültségimpulzusok csúcserőit mutatják. A PRPD ábrák elkészítése során a mért jel lokális maximumai 2 percen keresztül lettek rögzítve egy 20 ms széles időablakban, a tápfeszültség $[0^\circ, 360^\circ]$ fázishelyzet-tartományában. Ennek a megoldásnak egy pozitívuma a hagyományos PRPD ábrákkal szemben, hogy megjelenik rajta a feszültségimpulzusok polaritása is, így minőségileg jobban vizsgálható az aszimmetrikus források pozitív és negatív részkisüléseinek jellege.

A PRPD ábrák alkalmasak lehetnek a különféle részkisülés típusok azonosítására és szeparációjára egyaránt. Az ábrákból kinyerhető legfőbb információk a kisülés fázishelyzete, intenzitása, és ismétlődési gyakorisága. Ezekből az adatokból különböző transzformációk vagy mintafelismerő algoritmusok segítségével akár több párhuzamosan sugárzó forrás jele is felismerhető és szeparálható. Ahogy a PRPD ábrákat, úgy ezeket a technikákat is alapvetően vezetett részkisülés mérések során alkalmazzák, így az elsugárzott elektromágneses jelek vizsgálata új fejlesztési irányvonalaknak nyithat utat a jövőben.

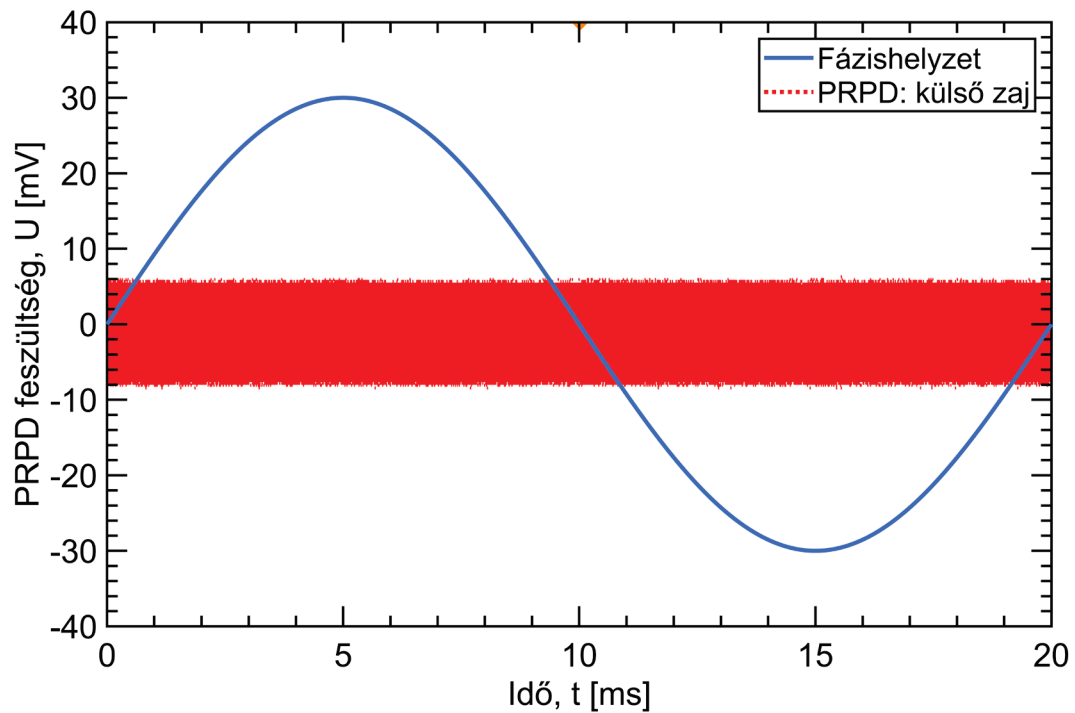
4.2.1.1 Mérőrendszer zajának PRPD ábrái

A források vizsgálatának megkezdése előtt meg kellett bizonyosodni a mérőrendszer zajmentes működéséről. Ennek során kiemelt figyelmet kellett fordítani a transzformátor által keltett esetleges részkisülésekre. Ennek vizsgálatára a 37. ábra PRPD diagramja lett elkészítve, melyen látható, hogy a 2 perces vizsgálat során csupán elhanyagolható számú, és aránylag kis amplitúdójú impulzust vett a cella. Az ábra még szemléletesebb, ha összevetjük a 38. ábra külső zajsintjével, melynek mérése során a

transzformátor feszültségmentes állapotban volt, a cella elektromágnesesen árnyékoló ajtaja viszont nyitva lett hagyva.



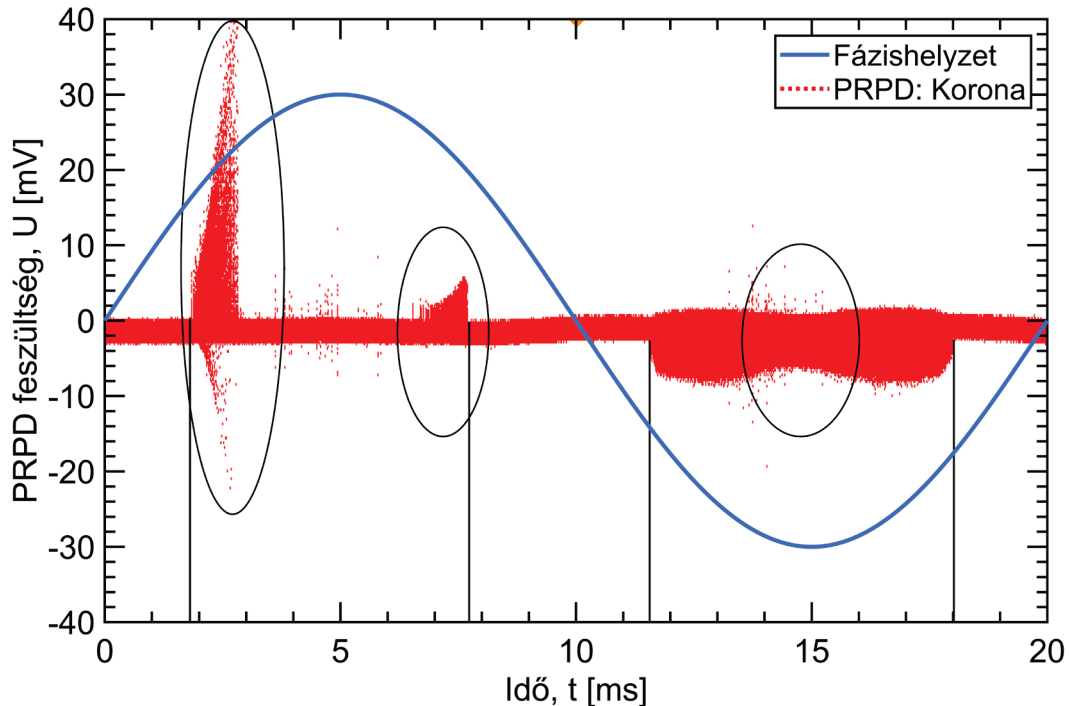
37. ábra: Mérőrendszer PRPD ábrája



38. ábra: Külső zaj PRPD ábrája

4.2.1.2 Koronakisülés PRPD ábrái

A Korona elnevezésű forrás elektródtávolsága a szimulációs eredményekre alapozva 17 mm-nek lett választva. Az így kapott PRPD ábrát mutatja a 39. ábra, melyen jól megfigyelhető a koronakisülés jellegzetesen eltérő viselkedése a két félciklusban.



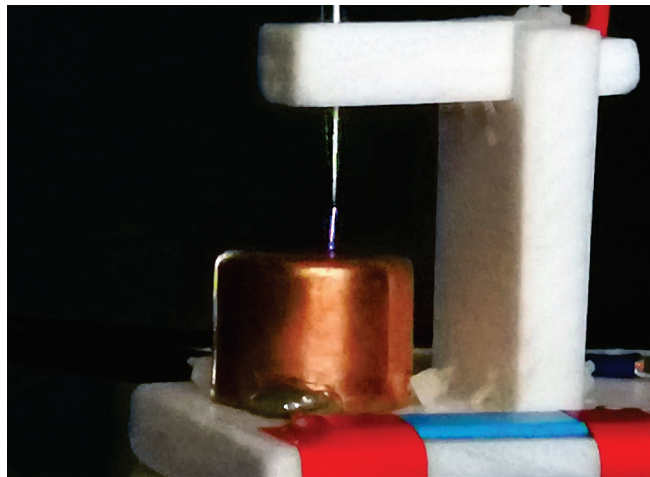
39. ábra: Korona forrás PRPD ábrája (d=17mm)

A pozitív félciklusnál a feszültség növelésével keskeny sávban megjelenő intenzív streamer kisülések jelei láthatók, míg nagyobb feszültségek esetéig a kialakuló parázsfény kisülés impulzusmentes jellege látható. Az is megfigyelhető, hogy a feszültség felfutásakor a kialakuló streamer kisülések intenzitása többszöröse azoknak, melyek a feszültségcsúcstól történő lefutás során alakulnak ki. Tudva, hogy a streamerek áramimpulzusainak csúcsértéke arányos a vezető csatornájuk hosszával, ez azt jelenti, hogy a feszültség növekedésekor kialakuló streamerek fizikai kiterjedése többszöröse azoknak, melyek a feszültség lefutása során alakulnak ki.

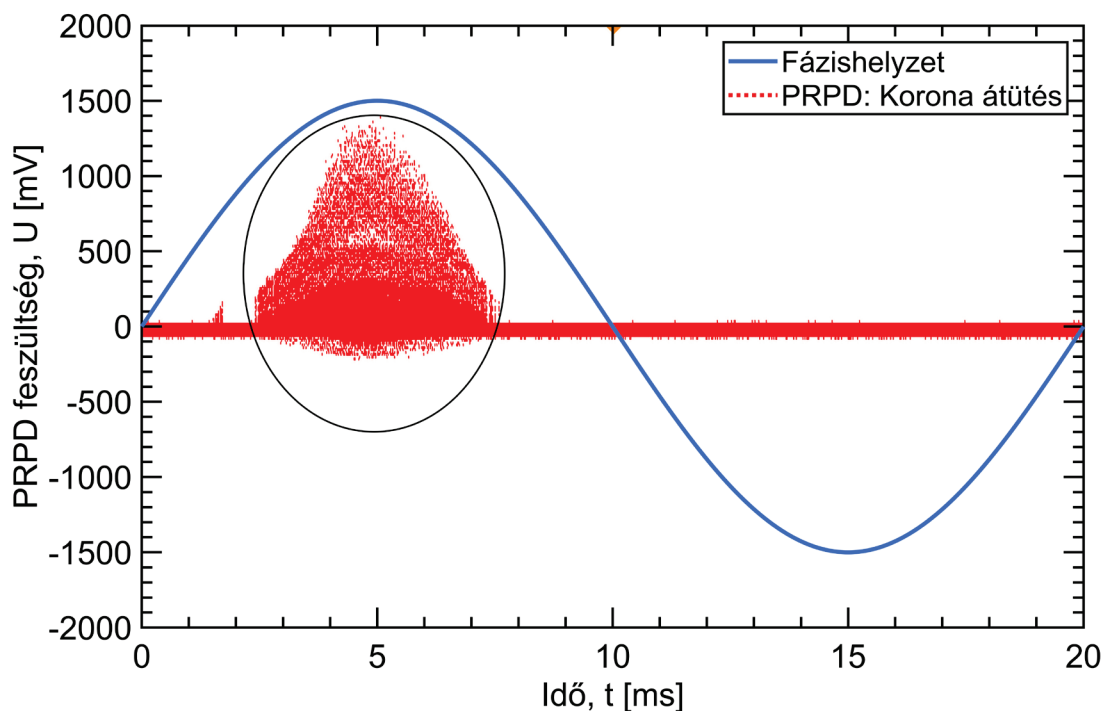
A negatív félciklusban a Trichel impulzusok sűrűn megjelenő, adott feszültség esetén közel változatlan amplitúdójú jelei láthatók, valamint megfigyelhető az impulzusok feszültség növekedésével szabályosan csökkenő amplitúdója is. Az ábra azt a várakozást is beigazolja, miszerint negatív félciklus esetén a koronakisülés

kialakulásának alacsonyabb a határfeszültsége. Ez a negatív félperiódusban fellépő részkisülési tartomány nagyobb szélességéből megállapítható.

A szimulációk során az 5 mm-es elektródtávolságra az az eredmény adódott, hogy ott már a teljes elektródközben teljesül a streamer terjedési feltétele, így várható a teljes átütés kialakulása. A koronakisülés nagyobb feszültségek esetén fellépő jelenségeinek, és a tű-sík elrendezés jellegzetes átütési tulajdonságainak tesztelésére 5 mm-es elektródtávolság esetén is el lett végezve a mérés, melynek során a 40. ábrán is látható szikrakisülések sorozata jelent meg az elektródok között. Az elrendezés PRPD ábráit a 41. ábra és a 42. ábra szemlélteti.

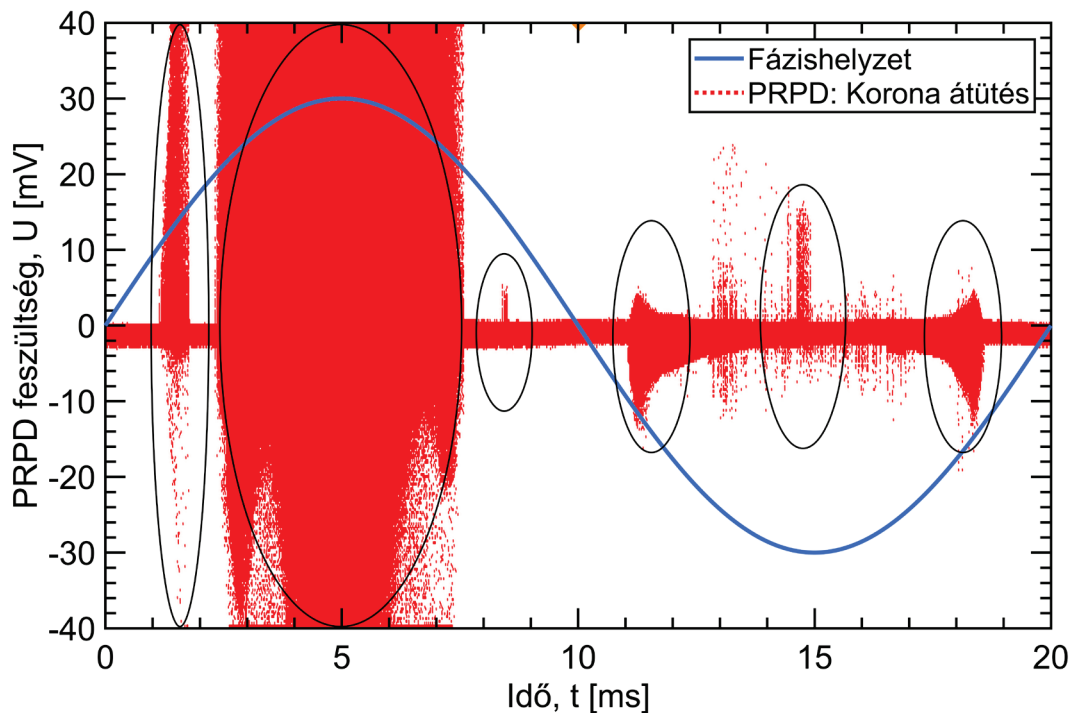


40. ábra: Korona forrás átütése



41. ábra: Korona forrás átütésének PRPD ábrája (d=5mm)

Az átütés ábráinak vizsgálatával további fizikai folyamatokra utaló jellegzetességek fedezhetők fel. Látható egyrészt, hogy átütés során a pozitív félperiódusban a koronakisülésnél több mint két nagyságrenddel nagyobb intenzitású a mért jel, valamint, hogy a feszültség változásával közel arányosan változik az átütés során kialakuló impulzusok amplitúdója. Az is látható, hogy az átütés a vártak szerint a pozitív félperiódusban alakult ki, itt ugyanis kisebb térerősség elegendő a streamerek terjedéséhez, az 5 mm-es elrendezés esetében pedig a negatív streamer terjedéséhez még nem elegendő a térerősség a teljes elektródközben.



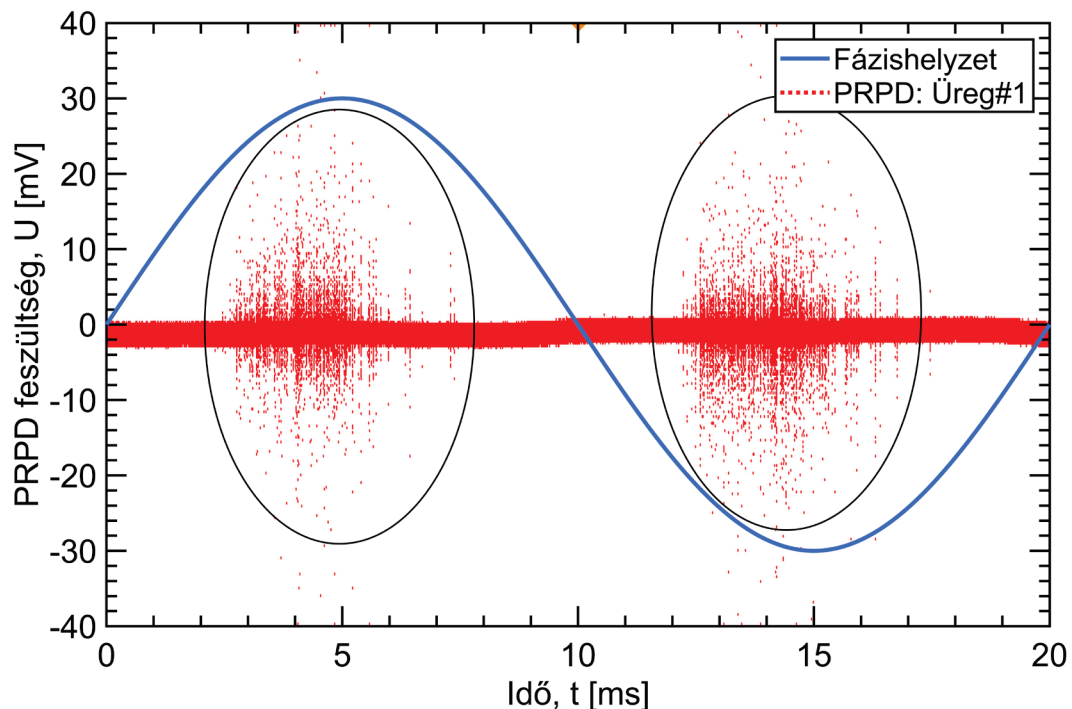
42. ábra: Korona forrás átütésének ráközelített PRPD ábrája (d=5mm)

A 42. ábra ráközelített képéből egyrészt megállapítható, hogy az átütés mellett továbbra is jelentkeznek a pozitív félperiódus kis intenzitású, keskeny feszültségsávbán jelentkező streamer kisülései, majd a feszültség növelésével kialakul a parázsfény kisülés impulzusmentes szakasza, ezt pedig a térerősség meredek növekedése következtében rövidesen az átütés intenzívebb kisülései követik. Ebben az esetben még az előző elrendezésnél is határozottabban tapasztalható az intenzitásbeli különbség a felfutó és a lefutó feszültség esetén kialakuló streamerek impulzusai, ezen keresztül pedig fizikai kiterjedésük között.

A negatív félperiódusban látható, hogy az előző esethez képest nőtt a térerősség, így a Trichel impulzusok, kialakulásukat követően, a feszültség növekedésével arányosan hamar megszűnnek, majd itt is kialakul a parázsfény kisülés. Ezt a kisülést a szinusz negatív csúcsánál a Trichel impulzusoknál nagyobb amplitúdójú negatív streamerek váltják fel, melyek a feszültség további növelése esetén idővel negatív átütéshez vezettek volna.

4.2.1.3 Üregkisülés PRPD ábrái

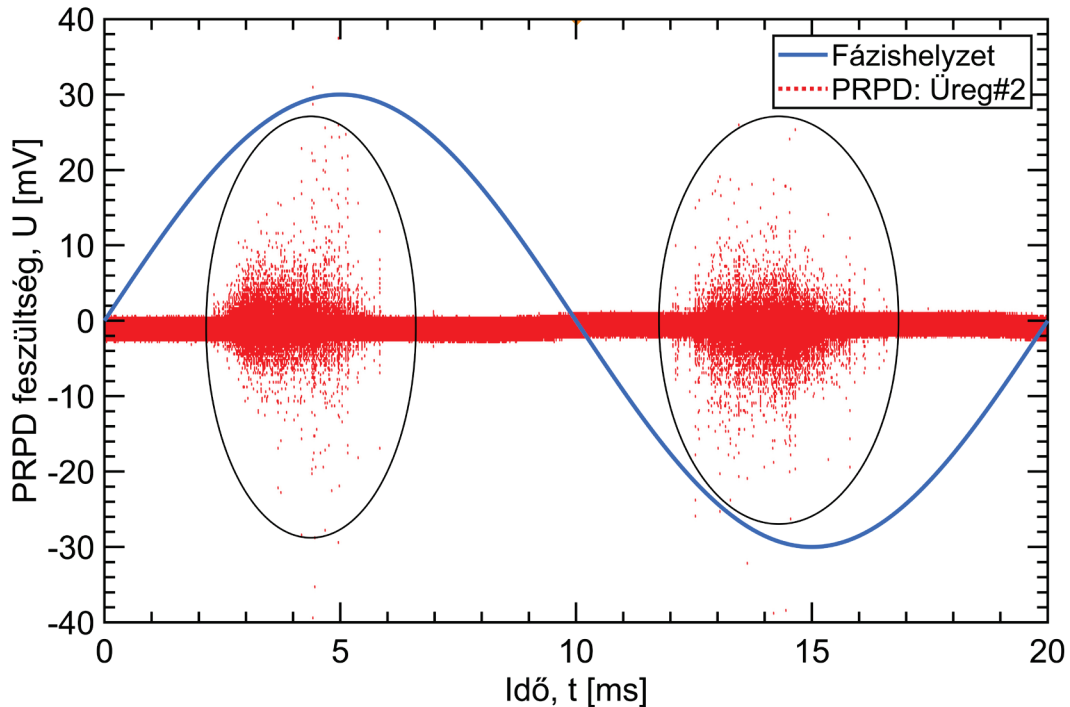
Az Üreg#1 és Üreg#2 elnevezésű minták PRPD ábráit a 43. ábra és a 44. ábra mutatja be. Látható, hogy az üregkisülések jelei átlagosan intenzívebbek, mint a korona impulzusai voltak. A koronakisülés esetén csak a pozitív felfutó feszültségnél kialakuló streamerek intenzitása haladta meg az üregkisülések amplitúdóit. Az intenzitásbeli különbség, mely a Trichel impulzusok amplitúdójával összevetve egyértelmű, összhangban van a 9. ábra tartalmával is, ahol egymáshoz viszonyítva lett bemutatva az egyes rész kisülés típusok intenzitása.



43. ábra: Üreg#1 forrás PRPD ábrája

Mindkét elrendezés esetén megfigyelhető a szimmetrikus elrendezés hatása, ugyanis a szinusz mindkét félperiódusában hasonló jellegű kisülési viselkedés tapasztalható. A félperiódusok vizsgálatával kimutatható a térerősség növekedésének

hatása, ugyanis a pozitív felfutó, illetve a negatív lefutó szakasz mentén a kisülési jelek amplitúdója a feszültség növekedésével egyre nő, majd a szinuszcúcs közelébe érve az elvárásoknak megfelelően ismét csökkenésnek indul.



44. ábra: Üreg#2 forrás PRPD ábrája

Az ábrák összehasonlításával látható, hogy a #2 forrás esetén koncentráltabban és nagyobb ismétlődési gyakorisággal jönnek létre a kisülések. Ennek valószínű oka a források buborékméretei közötti különbség, ugyanis ezek a #2 forrás esetében valamivel nagyobbak voltak. A buborékméreteket közelítőleg ismerve, a (7) egyenlőtlenesség és a 22. ábra görbéi alapján a #2 mintára nagyobb $\frac{E_{\text{üreg}}}{E_{\text{gyújtás}}}$ arány adódik, mely hozzájárulhat a kisülések gyakoribb kialakulásához.

Mindkét ábrán látható, hogy a koronakisülés ismétlődési gyakoriságához képest az üregkisülések ritkábban alakultak ki. Ennek fő oka a légüreg kis mérete, és zárt elrendezése, melynek következtében a streamer megindulásához előzetesen szükséges startelektronok kisebb valószínűséggel tudnak kialakulni. Ezt jelentősen befolyásolja a buborék belső felületének minősége és a dielektrikum anyaga is, ez pedig hatással van a kialakuló PRPD ábra jellegére. A vizsgált esetekben például a szinusz nullátmeneténél még nem alakul ki a kisülés, mely több irodalmi példával is összhangban van, viszont

olyan eredmények is léteznek, ahol az üregkisülés PRPD diagramja a 6. ábrának megfelelő ideális jelleget mutatja.

A startelektronok keletkezésének valószínűsége a buborékméret növelésével szintén nő, hisz nagyobb az ionizálható részecskék száma. Ez szintén magyarázatot adhat arra, hogy a #2 minta nagyobb buborékjaiban miért jelentkeznek nagyobb gyakorisággal a kisülések, hiszen ha a startelektron kialakulása valószínűbb, akkor adott idő alatt több fog belőle kialakulni, így a kisülések is gyakrabban fordulhatnak elő.

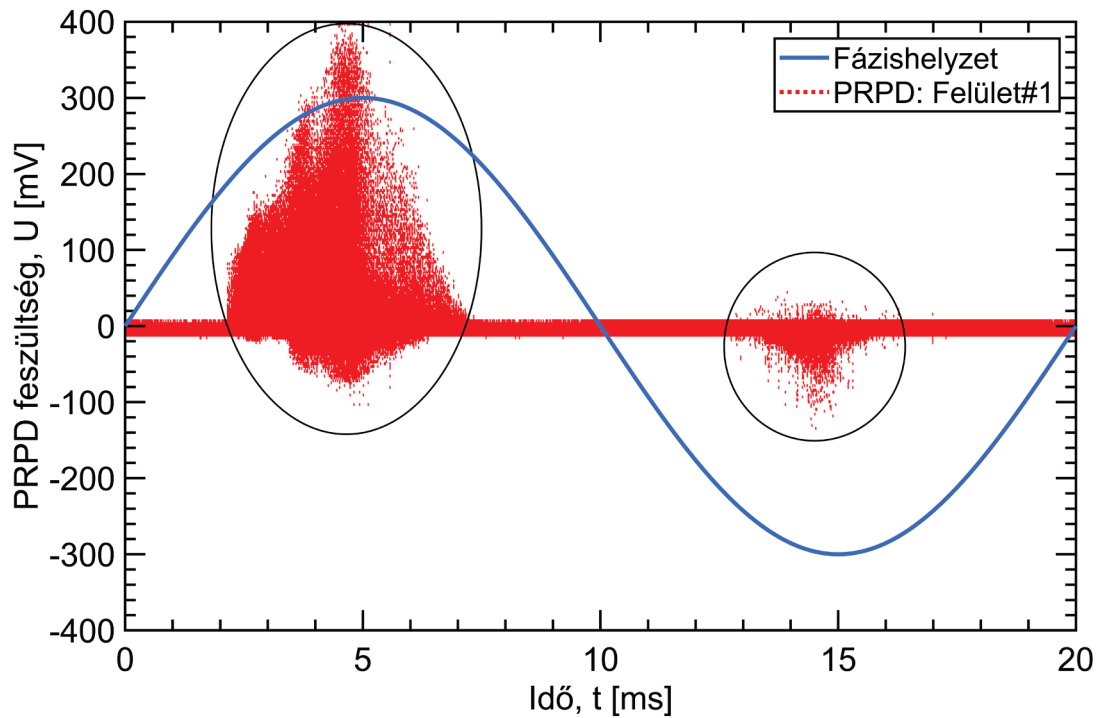
Ez az elmélet magyarázatot ad arra a megfigyelésre is, miszerint az #1 minta kisüléseinek amplitúdói nagyobbak, mint a nagyobb buborékokat tartalmazó minta esetén, miközben előfordulási gyakoriságuk kisebb. Ahogy az a 7. ábrán is látható, a térerősség növelésével egyre nő az üreg felületén felhalmozódó töltés mennyisége, majd a kisülés kialakulásakor ennek a töltésnek a jelentős része átkerül az üreg túloldalára. Ez a folyamat felfogható úgy, mint az üreg kapacitásának töltődése, majd a felhalmozott töltés kisülése a startelektron létrejöttékor. Így tehát mivel az #1 minta kisebb buborékjai esetén többet kell várni a startelektron kialakulására, az üreg kapacitása ez idő alatt tovább töltődik, növelve a felhalmozódó töltés mennyiségét. Ezt a megnövekedett töltésmennyiséget fogja átvinni a kialakuló kisülés az üreg túloldalára, mely a #2 minta kisebb, gyakrabban kisülő töltéseihez képest nagyobb kisülési áramot eredményez. A nagyobb áramimpulzus intenzívebb elsugárzott elektromágneses hullámot eredményez, melynek hatására a PRPD ábra feszültség értékei is nagyobbak lesznek.

4.2.1.4 Felületi kisülés PRPD ábrái

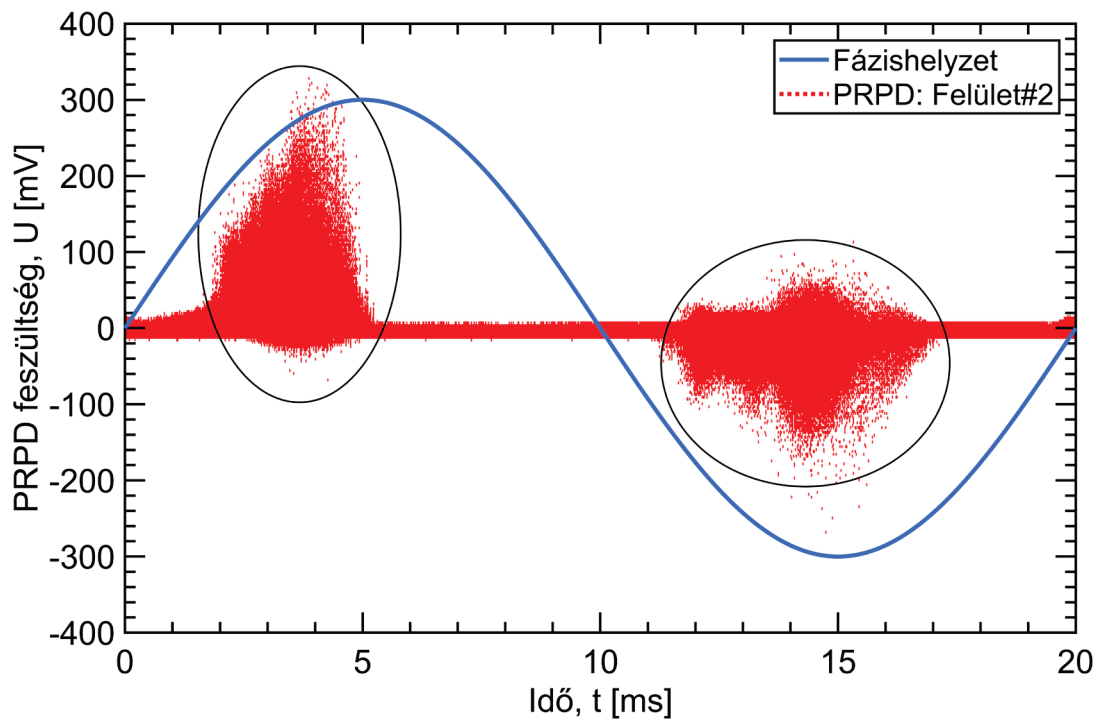
A Felület#1 és Felület#2 elnevezésű minták PRPD ábráit a 45. ábra és a 46. ábra mutatja be. Látható, hogy a 9. ábrával összehangban, ezek a kisülések valóban sokkal intenzívebbek az eddig vizsgált típusoknál. Az üregkisüléssel összehasonlítva is több, mint tízszer akkora amplitúdók tapasztalhatók a felületi kisülések esetén. Megfigyelhető az is, hogy az elrendezés aszimmetriája a két félperiódusban eltérő alakú és intenzitású PRPD ábrát hoz létre. A pozitív félperiódus kisülései mindkét esetben nagyobb amplitúdójú feszültségimpulzusokat keltenek. Intenzitásuk a szinusz felfutó szakaszán a feszültséggel arányosan nő, majd a szinusz csúcsa közelében ennél meredekebben csökken vissza nullára.

Ezzel szemben a negatív félperiódus kisebb intenzitású impulzusai szimmetrikusabban oszlanak el. Egyrészt látható, hogy az impulzusok

szimmetriatengelye közelebb tolódik a szinusz negatív csúcsához, másrészt az impulzus amplitúdók csökkenése hasonló meredekséggel történik, mint azok növekedése.



45. ábra: Felület#1 forrás PRPD ábrája



46. ábra: Felület#2 forrás PRPD ábrája

Szembetűnő eltérés a két ábra között, hogy míg az #1 minta pozitív kisülései nagy amplitúdójúak és széles fázistartományt fednek le, addig ezek az impulzusok a #2 minta esetén kisebb amplitúdójúak, és keskenyebb fázistartományt fednek le, azaz hamarabb szűnnek meg, mint az #1 esetben. A negatív félperiódus esetén még látványosabb a különbség, ugyanis az #1 esetben csak a szinuszcúcs közelében alakulnak ki kisülések, és azok is aránylag kis amplitúdóval, míg a #2 esetben a félperiódus jelentős részét kitöltik, amplitúdójuk pedig megközelíti a pozitív kisülések amplitúdó értékeit.

A pozitív és negatív félperiódusok közötti amplitúdó eltérésre magyarázatot adhat a streamerek terjedéséhez szükséges térerősségek eltérése a két polaritásra valamint az amplitúdónak a streamer hosszával való arányossága. Pozitív streamer esetén ugyanis kisebb térerősség is elegendő annak terjedéséhez, így a felület mentén nagyobb távolságot képes megtenni, míg meg nem szűnik a terjedési térerősségfeltétel. A nagyobb megtett távolság nagyobb vezetési csatornahosszt, ez pedig nagyobb áramimpulzust jelent, mely a PRPD ábrán nagyobb feszültségszintként jelenik meg. Ugyanezzel magyarázható, hogy a negatív streamerek a szinuszcúscshoz közelebb tolódtak, ugyanis csak nagyobb feszültségszint mellett teljesül a terjedésükhöz szükséges feltétel.

A két minta közötti különbségek elemzése ennél összetettebb. A negatív streamerek közti intenzitáskülönbség az elrendezések szimulációs eredményeiből megérthető, ugyanis az #1 minta esetén a hármas találkozási pont mélyebbre van temetve, így a felületen kialakuló térerősség kisebb értékű. A kisebb térerősség kisebb terjedési távolságot tesz lehetővé, mely kisebb amplitúdót eredményez. A #2 forrás esetén a találkozási pont közelében a villamos tér közel duplája az #1 forrás terének, PRPD ábrája a pozitív félperiódusban mégis kisebb amplitúdókat mutat. Ennek lehetséges okai a felülettel érintkező elektródreszek közötti geometriai különbség, valamint az epoxi felületének jellege közötti különbség a két elrendezés esetén. Utóbbi abban nyilvánul meg, hogy míg az #1 mintánál egy megfelelő vastagságú epoxi rétegbe lett belesüllyesztve a felső elektród, addig a #2 minta esetében kis mennyiségű epoxigyanta lett az elektród alá kenve, így az elektród körül annak felülete egyenetlenebbé vált. A jelenség pontos fizikai magyarázata további szimulációkat és vizsgálatokat igényel.

4.2.2 Részkisülés impulzusok idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálata

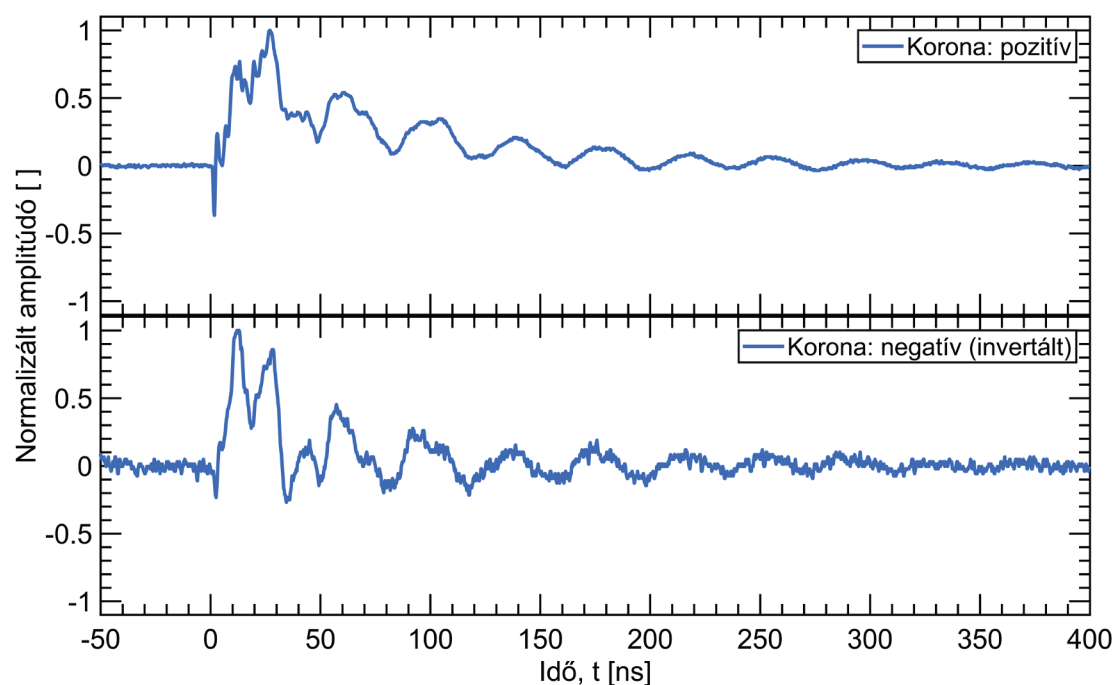
A vizsgált minták időtartománybeli vizsgálata során a szinusz mindkét félperiódusa alatt rögzítésre került több különálló részkisülés impulzus is. Ezekből

mintánként ki lett választva 2-2 jellegzetes jelalak, melyeknek további vizsgálatával átfogó kép kapható az adott minta pozitív és negatív félperiódus során keltett feszültségjeleinek idő- és frekvenciatartománybeli jellegzetességeiről. A frekvenciatartománybeli vizsgálat során a jelek teljesítmény spektruma lett meghatározva és dB skálán ábrázolva a frekvencia függvényében. A teljesítmény spektrum a diszkrét mintavételezett jel gyors Fourier transzformáltjának (FFT) négyzetre emelt abszolút értékeként adódik és megmutatja a jelteljesítmény frekvenciatartománybeli eloszlását.

A jellegzetes jelalakok és teljesítmény spektrumaik összehasonlíthatóságának érdekében a jelek először abszolút csúcsertékük szerint normálva lettek, majd a negatív impulzusok egy invertáláson is átestek. Ezt követően a jelek kisülés típusonként idő- és frekvenciatartományban egyaránt összehasonlításra kerültek. A frekvenciatartománybeli vizsgálatok célja az adott kisüléstípusra jellemző domináns frekvenciák meghatározása volt.

4.2.2.1 Koronakisülés jellegzetes jelei

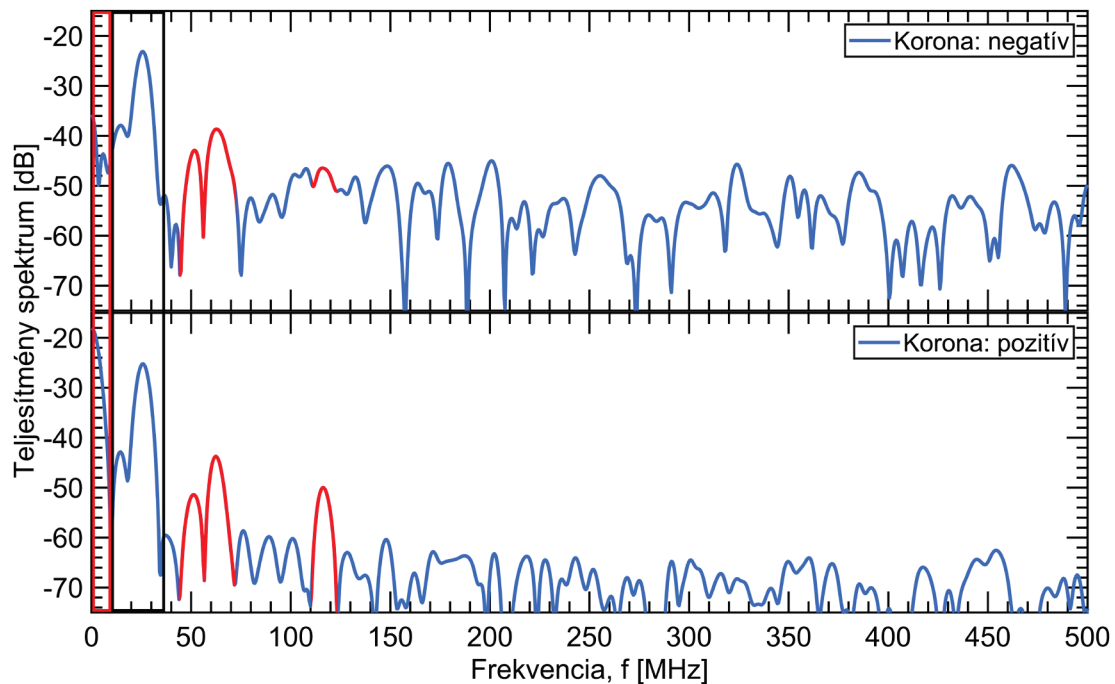
A Korona forrás jellegzetes pozitív és negatív részkisülés impulzusait a 47. ábra szemlélteti, míg ezek frekvenciatartománybeli képe a 48. ábrán látható.



47. ábra: Koronakisülés jellegzetes jelalakjai

A fenti ábra alapján megállapítható, hogy bár a pozitív és negatív korona során eltérő fizikai folyamatok játszódnak le, elsugárzott impulzusaik időtartománybeli képe

mégis hasonló jelleget mutat. Érdekes kiemelni az impulzusok polaritások jellegét, ami azt jelenti, hogy oszcillációjuk során csupán minimális mértékben váltanak polaritást.



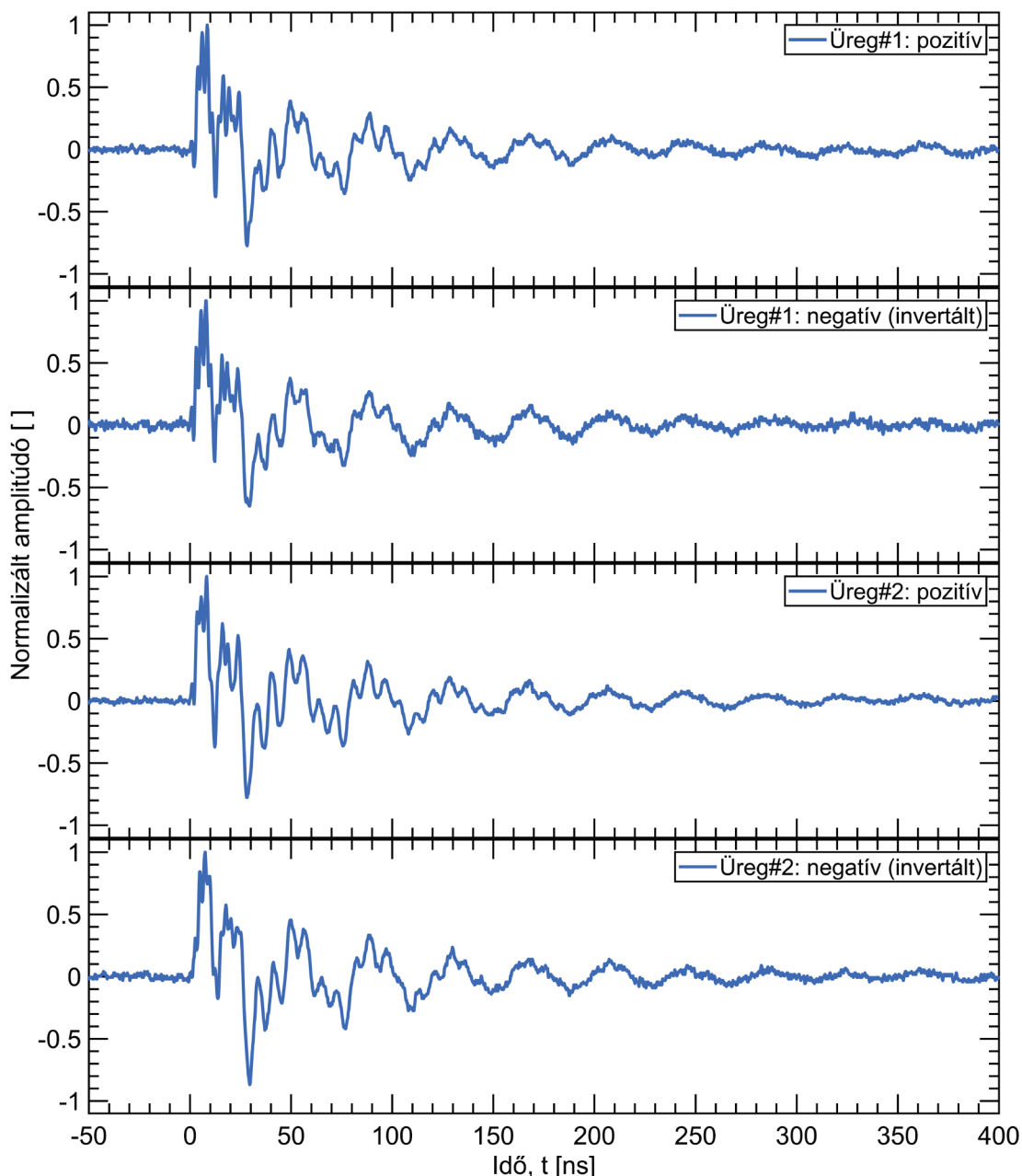
48. ábra: Koronakisülés jellegzetes jeleinek teljesítmény spektrumai

A fenti ábra alapján a két legdominánsabb frekvenciatartomány a pirossal keretezett 0 MHz és a feketével keretezett 25 MHz körül található, ezek viszont nem tekinthetők a koronakisülésre jellemző karakterisztikus frekvenciáknak a következő okokból. Az intenzív egyenfeszültségű komponens a feszültségimpulzusok polaritások jellegével magyarázható, míg a 25 MHz-es komponens a lecsengő jelalak 40 ns periódusú oszcillációjából származik. Ez utóbbi a kisülésforrás kapacitásából és a hozzávezetések induktivitásából álló rezgőkör válasza a kisülés áramimpulzusára.

Ezt a két frekvenciatartományt figyelmen kívül hagyva az ábrán pirossal jelölt 50, 65 és 115 MHz körüli frekvenciasávok fordultak elő mindkét jelben dominánsan. Utóbbi frekvenciasáv a negatív impulzus spektrumából nem emelkedik ki egyértelműen, ez viszont a kisülés kisebb feszültség szintje következtében a jel zajának torzításával magyarázható.

4.2.2.2 Üregkisülés jellegzetes jelei

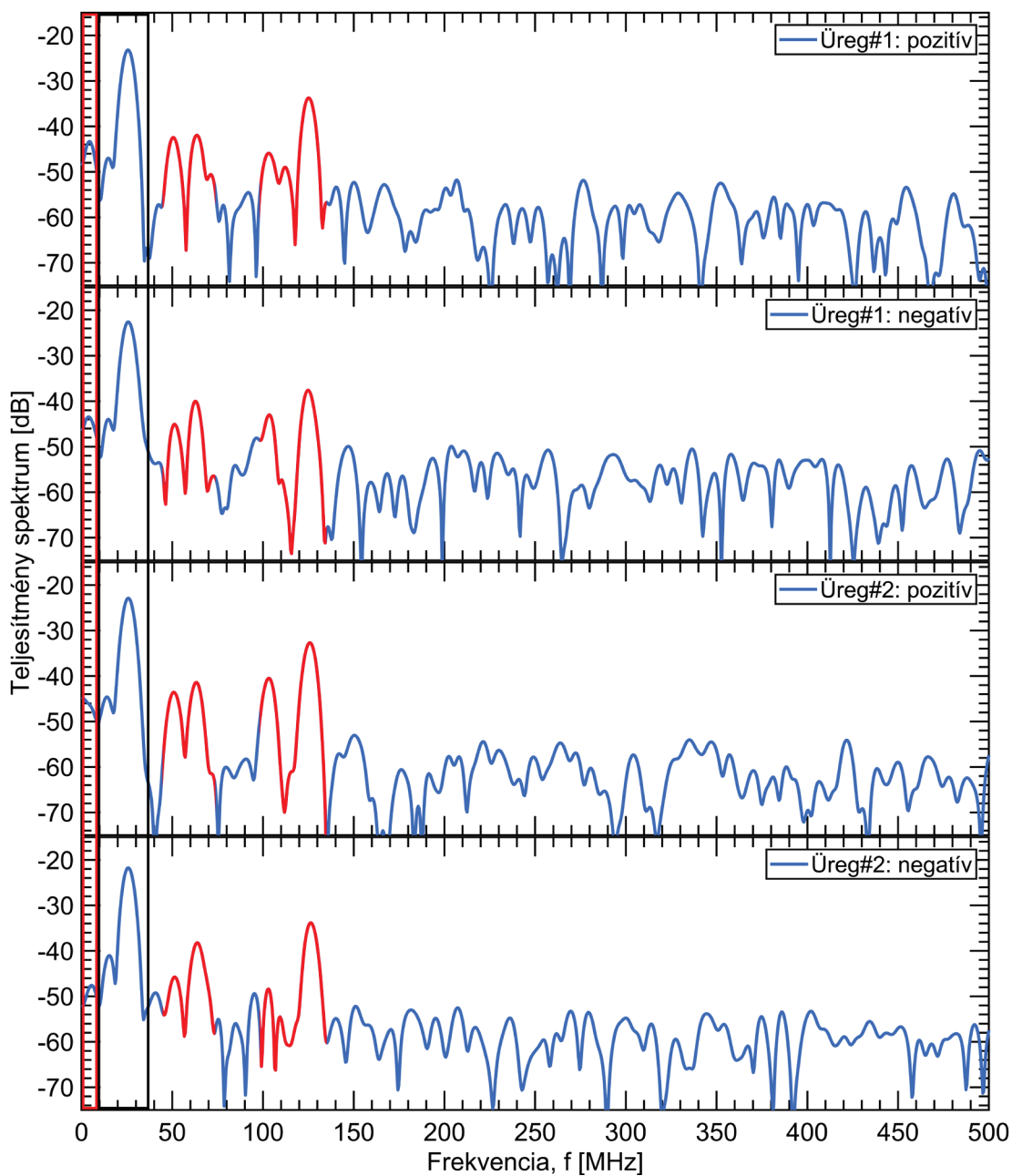
Az Üreg#1 és Üreg#2 források jellegzetes pozitív és negatív részkisülés impulzusait a 49. ábra szemlélteti, míg ezek frekvenciatartománybeli képe az 50. ábrán látható.



49. ábra: Üregkisülés jellegzetes jelalakjai

A fenti ábra jeleinek szinte tökéletesen egyforma alakja az üregkisülés szimmetrikus jellegéből és a két forrás közel azonos geometriájából adódik.

Az 50. ábra spektrumaiban ugyanúgy jelen van a 25 MHz-es komponens, az egyenfeszültségű tag viszont kevésbé intenzív, mint a koronakisülés esetében. Ez utóbbi azzal magyarázható, hogy az üregkisülés időtartománybeli jelei csupán kis mértékben mutatnak polaritások jellegét. E frekvenciatartományokon kívül az ábrán pirossal jelölt 50, 65, 105 és 125 MHz körüli frekvenciasávok voltak jelen dominánsan mind a négy vizsgált jelben.

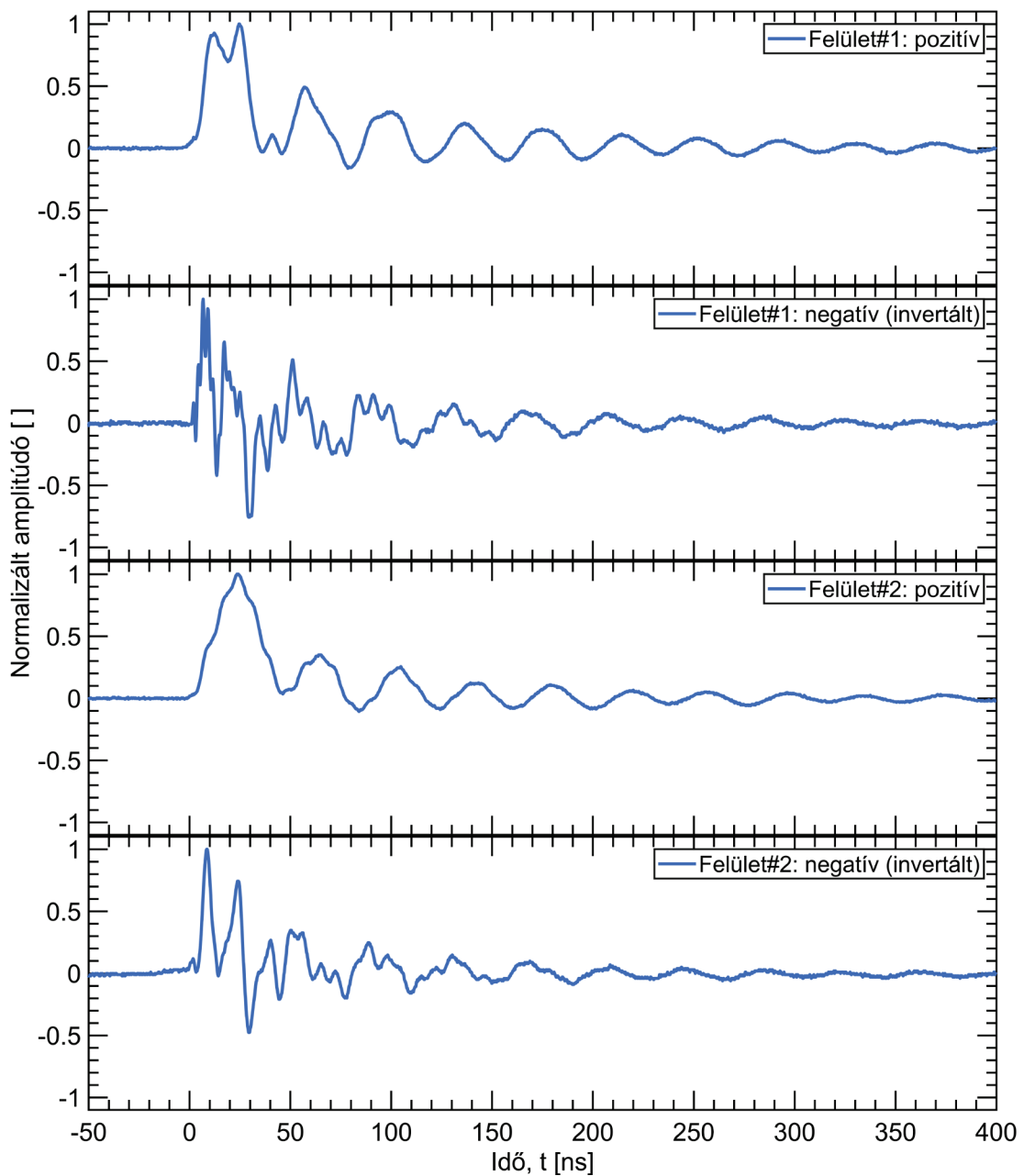


50. ábra: Üregkisülés jellegzetes jeleinek teljesítmény spektrumai

4.2.2.3 Felületi kisülés jellegzetes jelei

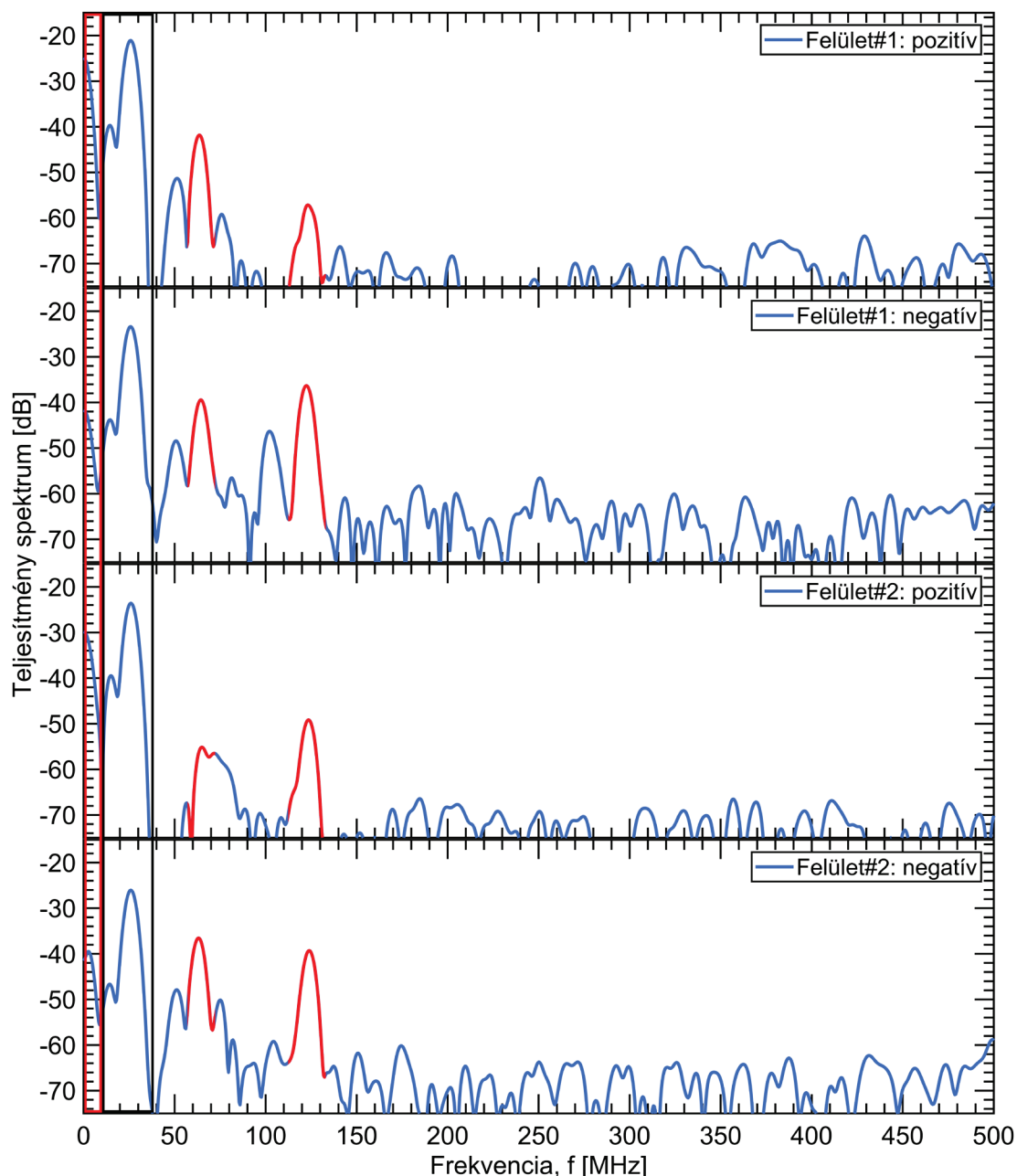
A Felület#1 és Felület#2 források jellegzetes pozitív és negatív részkisülés impulzusait az 51. ábra szemlélteti, míg ezek frekvenciatartománybeli képe az 52. ábrán látható. Az impulzusok jelalakjai jól tükrözik a felületi kisülés elrendezésének aszimmetrikus jellegét. A pozitív kisülés erősen polaritásos jelleget mutat, görbéje pedig az eddig vizsgáltaknál sokkal egyenletesebb futású. A negatív kisülés ezzel szemben oszcillációja során többször vált polaritást, görbéje pedig nagyfrekvenciás

komponensekkel terhelt. A jel polaritásos jellegének fokát ebben az esetben jól tükrözi a teljesítmény spektrum egyenfeszültségű komponensének nagysága.



51. ábra: Felületi kisülés jellegzetes jelalakjai

A jelek frekvenciatartománybeli képében az eddigiekhez hasonlóan jelen van a 0 és 25 MHz körüli két domináns sáv. E két tartományon túl, a vizsgált négy jelben egyaránt jelenlévő domináns frekvenciasávok a 65 és 125 MHz frekvenciák körül helyezkednek el.

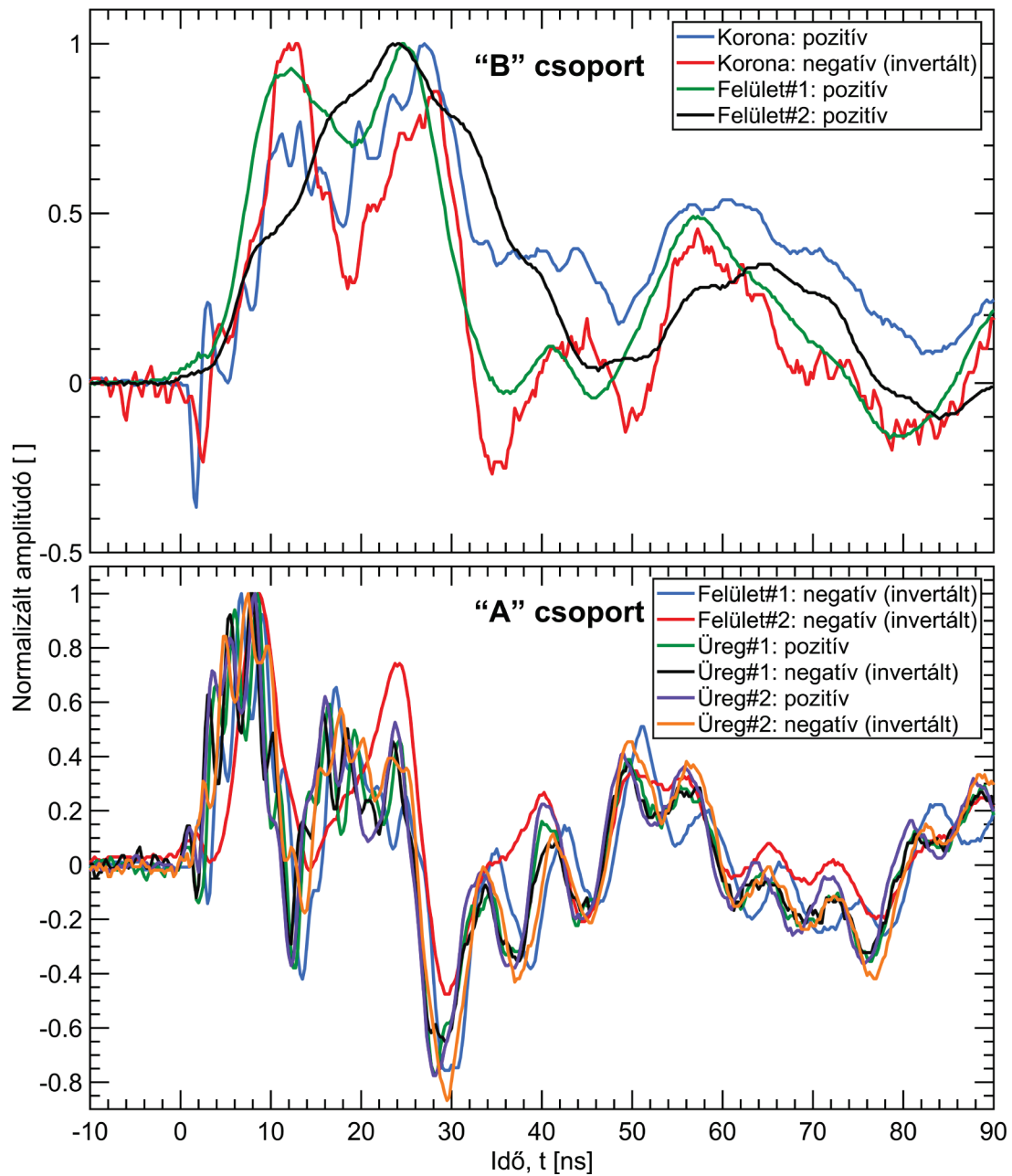


52. ábra: Felületi kisülés jellegzetes jeleinek teljesítmény spektrumai

4.2.2.4 A három kisüléstípus jeleinek összehasonlítása

A vizsgált 5 forrás 10 jellegzetes jelének domináns frekvenciái több esetben azonosak voltak vagy egymáshoz nagyon közel helyezkedtek el. Ez a hasonlóság a jelek időtartománybeli alakjában is látható. A negatív felületi-, valamint az üregkisülések („A” csoport) jelalakjai között komoly hasonlóság fedezhető fel, míg a pozitív felületi- és a koronakisülések („B” csoport) polaritásos jelei könnyebben megkülönböztethetők egymástól és a többi jeltől egyaránt. Az időtartománybeli impulzusok oszcilláló lecsengés

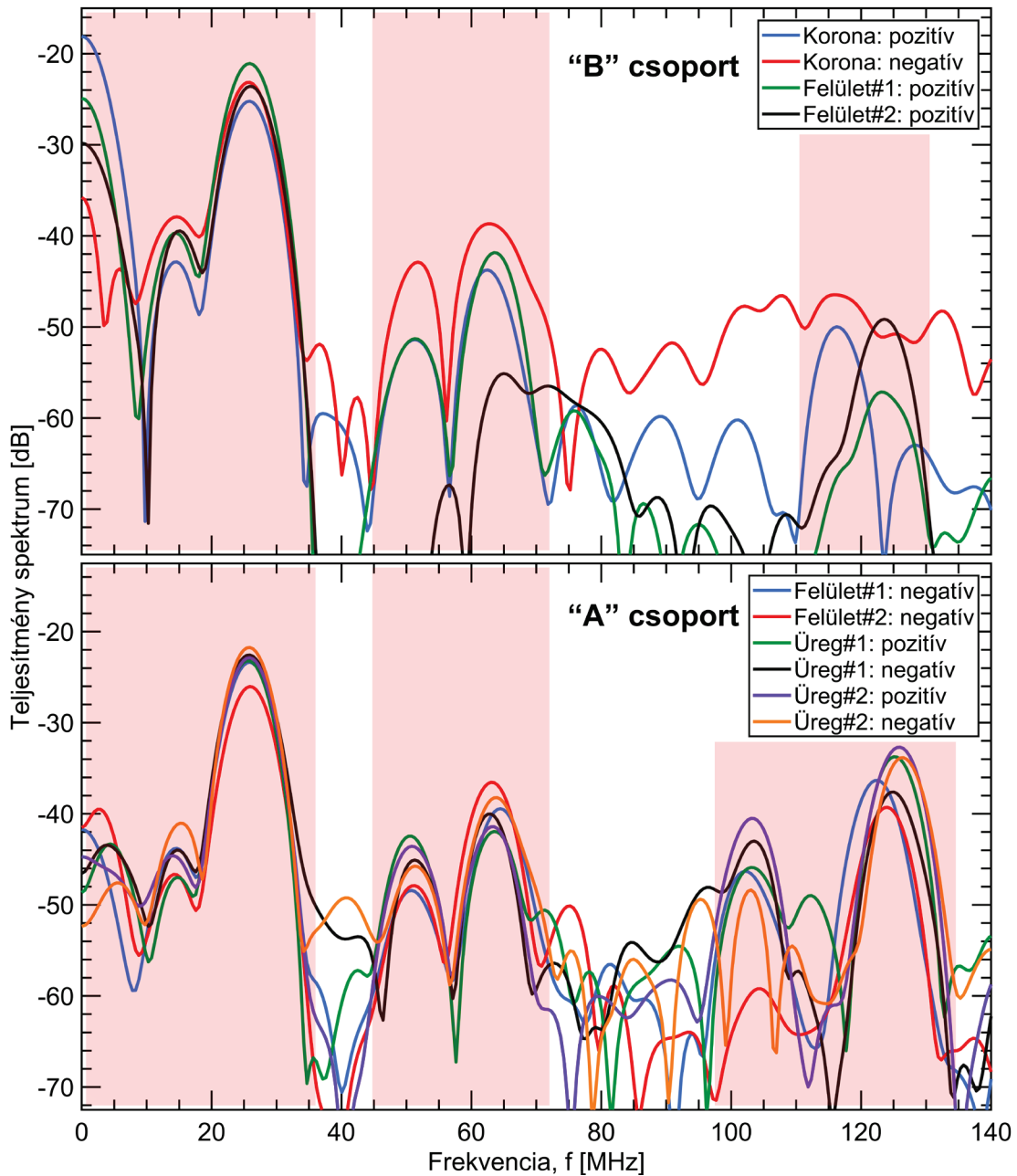
előtti alakjait hasonlítja össze az 53. ábra, teljesítményspektrumaikat pedig a domináns frekvenciák tartományában veti össze az 54. ábra.



53. ábra: Jellegzetes részkisülés jelalakok összehasonlítása

Az 53. ábra alapján is látható, hogy az „A” csoport jelei komoly hasonlóságot mutatnak, azonban a „B” csoport jeleiről sem mondható el, hogy jellegük nagy mértékben különbözne a többitől. Az egyetlen szignifikánsan eltérő jelalakot a Felület#2 forrás pozitív kisülése szolgáltatta, ez azonban nem általánosítható a felületi kisülésekre, tekintve, hogy a Felület#1 forrás azonos polaritású jele komoly hasonlóságot mutat a koronakisülések impulzusaival, valamint felismerhető benne az „A” csoport jeleinek

néhány jellegzetes vonása is. Az időtartománybeli hasonlóságokkal összhangban az 54. ábra világospiros háttérű domináns frekvenciasávjai között sem tapasztalható karakterisztikusnak tekinthető eltérés.



54. ábra: Jellegzetes részkiülés jelek teljesítmény spektrumainak összehasonlítása

5 Konklúzió

5.1 Eredmények értékelése

A bemutatott kutatás célja a részkisülések három alaptípusának elsugárzott elektromágneses jeleivel kapcsolatos információgyűjtés volt. Ezen információra egyrészt a részkisülések helyzetét meghatározó mérőrendszer zajszűrésért felelős egységének továbbfejlesztéséhez volt szükség. A szerzett adatok másik célul kitűzött felhasználási területe a kisülés típusát azonosító, többszörös forrás esetén pedig ezeket szeparáló egység kifejlesztésének megalapozása volt.

A zajszűrő egység frekvenciatartományban definiált szűrőinek beállításához a jelek teljesítmény spektrumainak vizsgálatára volt szükség. A spektrumokból meghatározott domináns frekvenciákra szűrve az adott kisülés típus jele hatékonyan szűrhető. Ebből a szempontból kedvezőnek számít a kapott eredmény, miszerint az egyes típusok között nincs jelentős eltérés a domináns frekvenciák terén. Általánosságban kijelenthető, hogy a vizsgált források jeleinek domináns frekvenciái a 140 MHz alatti frekvenciatartományban helyezkednek el.

Az eredmények alapján előírányzott szűrőtípus tehát egy 140-150 MHz törésponti frekvenciájú aluláteresztő szűrő, vagy egy 50-60 MHz és 140-150 MHz között működő sáváteresztő szűrő lehetne, mely kiszűri a jelek egyen komponenseit és lecsengő oszcillációit is. Ez a megoldás ilyen formájában azonban nem alkalmazható valós ipari környezetben, ugyanis a leírt frekvenciatartományba számos URH (Ultrarövid hullám: 30 – 300 MHz) tartományban működő rádió-, televízió- és radarjel dedikált frekvenciatartománya is belesik. Ennek megoldásához mérési helyszínenként előzetes mérésekre van szükség, amivel megállapítható, hogy a vizsgált frekvenciatartományban mely frekvenciákon vannak intenzív komponensei az alapzajnak. A részkisülések jeleinek megfelelő szűréséhez ezeket a frekvenciakomponenseket sávszűrő segítségével eliminálni kell. Ezt a mérést nem elég egyszer elvégezni, ugyanis az alapzaj frekvenciatartalma időben is folyamatosan változhat.

Ebből következik, hogy a kialakítandó mérőrendszerben fontos szerepet kell kapnia egy olyan egységnek, mely közvetlenül minden mérés előtt megállapítja a külső zaj vizsgált frekvenciatartományba eső domináns komponenseit, majd azokat megfelelően hangolt sávszűrők segítségével kiszűri. Egy ilyen működésű rendszer fizikai

megépítése is megfontolandó a koaxiális kábel és az oszcilloszkóp közé, ez ugyanis lehetővé tenné a zajszint alatti részkisülés impulzusokra való triggerelést is. Az ilyen triggerelés lehetőséget ad a zajszint alatti jelek forrásainak helymeghatározására is, hatékonyabbá téve ezzel a teljes mérőrendszert.

A Fourier transzformációra alapozó frekvenciatartománybeli zajszűrő módszerekre ígéretes alternatívát nyújt a Wavelet transzformáció [24], mely a vizsgált jelet nem periodikus szinuszjelekre bontja fel, hanem úgynevezett waveletekre, melyek meghatározott időtartamú és jelalakú tranziens szerű jelek. Ez a fajta transzformáció a vizsgált jel időtartománybeli alakját is figyelembe veszi, így megfelelően paraméterezve képes a Fourier transzformálnál reprezentatívabb képet adni, lehetővé téve a hatékonyabb zajszűrést. Ehhez a paraméterezéshez szolgál hasznos információval a részkisülés források jelalakjainak időtartománybeli vizsgálata, melynél a jelalakok közötti hasonlóság ebben az esetben is pozitívum, hisz így lehetséges egy általános, minden kisülés típusra hatékonyan alkalmazható Wavelet szűrő kifejlesztése.

Az egyes részkisülés típusok jeleinek hasonlósága zajszűrés szempontjából tehát pozitívumnak számít, a kisülések típusának megállapítását, illetve a típusok szeparációját viszont nehezebbé teszi. A hasonlóság miatt ugyanis nem elegendő a különálló feszültségimpulzusok vizsgálata, hanem szükség van a tápfeszültség egy teljes 20 ms hosszú periódusának a megfigyelésére is. Ebben nyújt hatékony segítséget a PRPD ábrák vizsgálatával kapott információ, melynek birtokában jelentős karakterisztikus különbségek fedezhetők fel az egyes kisüléstípusok között. A kutatás során a feszültségimpulzusok csúcserőértékei és fázishelyzeteik kerültek kiértékelésre, ez viszont még kiegészíthető a kisülések ismétlődési gyakoriságával és egyéb karakterisztikus jellemzőkkel is. Ezen jellemzők birtokában különféle mintafelismerő algoritmusok felhasználásával optimalizálható a kisülés típusának meghatározása.

5.2 Ipari felhasználhatóság, jövőbeli tervek

Ebben a fejezet részben ismertetésre kerülnek a dolgozatban említett helymeghatározó részkisülésmérő-rendszer fejlesztésének jelen kutatási eredményekre épülő következő fázisai. A zajszűrő rendszer továbbfejlesztése, valamint a részkisülés típusának azonosításáért és szeparációjáért felelős egység kifejlesztése előtt szükség van az alkalmazandó antennák hatásának vizsgálatára is. Ehhez először meg kell vizsgálni, hogy mely antennatípusok állnak rendelkezésre, valamint ezeknek milyen erősségeik, gyengeségeik vannak a felhasználási cél szempontjából. A mérőrendszer prototípusában negyedhullámhosszos teleszkópos szkener antennákkal zajlott a mérés, ezen antennák viszont nagy vertikális kiterjedésükkel és a rendszerbeli pont reprezentációjukkal komoly hibát vittek az becslés függőleges koordinátaiba. A cél tehát egy szimmetrikus felépítésű antennatípus alkalmazása, mely a meghatározott 140 MHz alatti frekvenciasávot képes komolyabb torzítás nélkül venni. A mérőrendszer továbbfejlesztéséhez először meg kell vizsgálni a választott antenna átviteli karakterisztikáját, mellyel meghatározható annak torzító hatása a dolgozatban bemutatott jelek idő- és frekvenciatartománybeli képére. Ehhez az öt részkisülés forrás jeleinek antennán keresztüli mérését először egy elektromágneses szempontból árnyékolt süketszobában kell elvégezni, hogy továbbra is zajmentes környezetben lehessen vizsgálni a jelalakokat. Ezt követően, a kapott eredmények birtokában megkezdhető a mérőrendszer fejlesztése.

Az epoxigyanta kiválasztása során leírtaknak megfelelően, a továbbfejlesztett helymeghatározó-, részkisüléstípus azonosító- és -szeparáló rendszer célzott alkalmazási területe az epoxival kiöntött tekercselésű száraztranszformátorok gyártástechnológiája. A gyártás utolsó fázisában a kész transzformátor szabványos villamos teszteken esik át, melyek során sor kerül a szabványos vezetett mérésre épülő részkisülés detektálásra is. A diagnosztikai mérőtérben kialakítható egy rögzített koordináta rendszer, valamint állandó jelleggel felhelyezhető több, ismert koordinátájú antenna is, melyek egyenletesen körülhatárolják a mérőtér térfogatát. Célszerű a szükséges 4 antennánál többet elhelyezni, így ugyanis a megfelelő 4 jel kiválasztásával számos különböző antenna elrendezés valósítható meg az antennák mozgatása nélkül, mellyel jelentősen pontosítható a becslés eredménye. Az ismert geometriájú transzformátort a mérőtér kijelölt, ismert koordinátájú pozíciójára helyezve lehetőség van egy háromdimenziós grafikus felület kifejlesztésére is. Ezen a felületen az adott transzformátor háromdimenziós modellje látható, valamint a

geometrián belül megjelenítésre kerül a helymeghatározás eredménye is, mellyel így könnyedén azonosítható a berendezés hibás egysége.

A mérőrendszer gyártástechnológiába integrálhatóságának feltételét képezi az automatizált működés, ez ugyanis lehetővé teszi a mérőrendszer működését a szabványos részkisülésdiagnosztikai méréssel párhuzamosan. Az automatizált rendszer nem igényel a szakszemélyzet részéről a mérést meghosszabbító kapcsolási tevékenységeket, továbbá képes a szabványos mérés végére érve becslést adni a részkisülés pozíciójára. Összességében tehát egy ilyen rendszer nem lassítja a diagnosztikai vizsgálatot, részkisülés jelenléte esetén viszont kifejezetten felgyorsítja azt. Ez lehetővé teszi, hogy a berendezés hibás egysége rövid időn belül kicserélésre kerüljön, elkerülve a teljes berendezés esetleges selejtezését, ezzel gazdaságilag is hozzájárulva a gyártósor hatékonyságához.

Köszönetnyilvánítás

Dolgozatom végére érve ezúton is szeretném kifejezni hálámat a **BME Nagyfeszültségű Laboratóriuma** vezetőjének, Dr. Németh Bálintnak, valamint helyettes vezetőjének, Cselkó Richárdnak, amiért a kutatás teljes időtartama alatt rendelkezésemre bocsátották a szükséges berendezéseket, továbbá segítségemre voltak a mérésekhez elengedhetetlen egyéb eszközök beszerzésében is.

Köszönöm továbbá a Laboratórium technikusának, Murányi Istvánnak, hogy a minták elkészítését hasznos gyakorlati tanácsaival szervesen segítette.

Szeretném továbbá kifejezni köszönetemet Kovács Róbertnek, az Elektronikai Technológia Tanszék munkatársának, amiért segítségemre volt a forrásokról készült makro- és mikro fényképek elkészítésében.

A DOLGOZAT AZ EMBERI ERŐFORRÁSOK MINISZTERIUMA ÚNKP-18-1 KÓDSZÁMÚ
ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT



EMBERI ERŐFORRÁSOK
MINISZTERIUMA

Ábrajegyzék

1. ábra: Elektronlavina tértöltésének hatása az eredő villamos térre [4]	8
2. ábra: Fotoionizáció szemléltetése [4]	9
3. ábra: Tú elektród villamos tere és ionizációs régiója [4].....	10
4. ábra: Koronakisülés gyújtási térerősségének függése a tüelektród hegyének görbületi sugarától.....	11
5. ábra: Üregkisülés gyújtási térerősségének függése a gömbszimmetrikus légüreg sugarától.....	13
6. ábra: Gázüreg feszültsége és árama az idő függvényében üregkisülés jelenléte esetén [4].....	14
7. ábra: Gázüreg villamos terének alakulása üregkisülés során [9].....	14
8. ábra: Felületi kisülés két jellegzetes elrendezése [2]	15
9. ábra: Alapvető részkisülés típusok intenzitásának összehasonlítása [2]	16
10. ábra: Epoxiba öntött tekercselésű száraztranszformátor [14].....	17
11. ábra: Epoxigyanta polimerizációs folyamata.....	18
12. ábra: Epoxi permittivitását meghatározó síkkondenzátor és szimulációs modellje .	20
13. ábra: Koronakisülés wolfram tüelektródja.....	22
14. ábra: Koronakisülés elektródelrendezésének szimulációs modellje.....	23
15. ábra: Tú-sík modell villamos tere a két elektród között, változó távolság esetén	24
16. ábra: Tüelektród villamos téreloszlása 17 mm elektródtávolság esetén.....	24
17. ábra: A szimulációk alapján megépített koronakisülés forrás	25
18. ábra: Üregkisülés szimulációs modellje	25
19. ábra: Buborék villamos tere normalizált buborékméret és változó D/d arány esetén (d=1mm)	26
20. ábra: Buborék modell villamos téreloszlása 1 mm epoxi vastagság és 50% D/d arány esetén	27
21. ábra: Üreg maximális térerőssége D/d függvényében az ideális értékhez viszonyítva	28
22. ábra: Üreg relatív villamos tere a gyújtási térerősséghez viszonyítva, d és D/d függvényében.....	28
23. ábra: #1 és #2 számú üregkisülés minta légbuborékos epoxi rétegei	29

24. ábra: Üregkisülés forrás oldalsó csavaros hozzávezetésének modellje és szimulációja (d=1.5mm)	30
25. ábra: Üregkisülés forrás függőleges csavaros hozzávezetésének modellje (d=1.5mm)	30
26. ábra: Üregkisülés forrás függőleges csavaros hozzávezetésének szimulációja (d=1.5mm)	31
27. ábra: A szimulációk alapján megépített üregkisülés források	31
28. ábra: Felületi kisülés kiindulási modelljének téreloszlása (d=2mm).....	32
29. ábra: Felület#1 és Felület#2 elektródelrendezések hármas találkozási pontjai	33
30. ábra: A kiindulási szimuláció alapján megépített felületi kisülés források	34
31. ábra: Felület#1 elektródelrendezés szimulációs villamos téreloszlása (d=2mm).....	34
32. ábra: Felület#2 elektródelrendezés szimulációs villamos téreloszlása (d=1.5mm)..	34
33. ábra: Felületi elrendezések villamos tere a hármas találkozási pontból kiindulva ...	35
34. ábra: GTEM cella sematikus felépítése [18].....	37
35. ábra: A nagyfeszültség előállítására használt transzformátor.....	37
36. ábra: Mérési elrendezés a mesterséges részkisülés források tesztelésére	38
37. ábra: Mérőrendszer PRPD ábrája	40
38. ábra: Külső zaj PRPD ábrája	40
39. ábra: Korona forrás PRPD ábrája (d=17mm)	41
40. ábra: Korona forrás átütése	42
41. ábra: Korona forrás átütésének PRPD ábrája (d=5mm)	42
42. ábra: Korona forrás átütésének ráközelített PRPD ábrája (d=5mm)	43
43. ábra: Üreg#1 forrás PRPD ábrája	44
44. ábra: Üreg#2 forrás PRPD ábrája	45
45. ábra: Felület#1 forrás PRPD ábrája	47
46. ábra: Felület#2 forrás PRPD ábrája	47
47. ábra: Koronakisülés jellegzetes jelalakjai.....	49
48. ábra: Koronakisülés jellegzetes jeleinek teljesítmény spektrumai	50
49. ábra: Üregkisülés jellegzetes jelalakjai.....	51
50. ábra: Üregkisülés jellegzetes jeleinek teljesítmény spektrumai	52
51. ábra: Felületi kisülés jellegzetes jelalakjai.....	53
52. ábra: Felületi kisülés jellegzetes jeleinek teljesítmény spektrumai	54
53. ábra: Jellegzetes részkisülés jelalakok összehasonlítása	55
54. ábra: Jellegzetes részkisülés jelek teljesítmény spektrumainak összehasonlítása	56

Irodalomjegyzék

- [1] Szirtes Máté, "*Részkisülést detektáló és térben lokalizáló mérési rendszer fejlesztése*" (TDK dolgozat), Tudományos Diákköri Konferencia - BME - VIK, Budapest, 2017
- [2] A. Kuchler, "*High Voltage Engineering: Fundamentals - Technology - Applications*" (Book), 2017
- [3] K. Korneliussen, "*Partial Discharges and Breakdown Voltage in Designs with Triple Junctions under AC Stress*" (Thesis), Norwegian University of Science and Technology, 2016
- [4] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, "*High Voltage Engineering: Fundamentals - Second edition*" (Book), 2000
- [5] A. Pedersen, T. Christen, A. Blaszczyk and H. Boehme, "*Streamer inception and propagation models for designing air insulated power devices*," 2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach, VA, 2009, pp. 604-607.
- [6] K. Shang, X. Xue and X. Wang, "*Trichel Pulse Characteristics in Negative dc Corona Discharge*," 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, 2011, pp. 1-4.
- [7] H. A. Illias, M. A. Tunio, H. Mokhlis, G. Chen and A. H. A. Bakar, "*Determination of partial discharge time lag in void using physical model approach*," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 1, pp. 463-471, Feb. 2015.
- [8] S. A. Boggs, "*Partial discharge. III. Cavity-induced PD in solid dielectrics*," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 6, no. 6, pp. 11-16, Nov.-Dec. 1990.
- [9] F. Gutfleisch and L. Niemeyer, "*Measurement and simulation of PD in epoxy voids*," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no. 5, pp. 729-743, Oct. 1995.
- [10] Yuanyuan Li et al., "*Characteristics of flashover and discharge over the surface of Ethylene Propylene Rubber*," 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Xi'an, 2016, pp. 1024-1027.
- [11] S. Chatterjee and M. H. Nazemi, "*Influence of viscosity and conductivity of water droplets on partial discharge inception voltages of polymeric insulating surfaces*," 2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE), Shillong, 2015, pp. 1-4.
- [12] E. E. Woods and F. W. Heinrichs, "*Cast epoxy insulation for high voltage switchgear and power transformers*," 1963 EI Electrical Insulation Conference Materials and Application, Chicago, IL, 1963, pp. 265-267.

- [13] TaoLi, Ping Sun, Qingquan Qiu, Bin Wang and Qingfu Li, "A CAD integrated system for epoxy resin casting dry type transformers," 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, 2005, vol. 3, pp. 2474-2477.
- [14] Száraztranszformátor fénykép: <https://www.energy.siemens.com/br/en/power-transmission/transformers/distribution-transformers/geafol-transformers.htm> (letöltve: 2018. 10. 13.)
- [15] V. Griseri, "The effects of high electric fields on an Epoxy resin" (Thesis), University of Leicester, 2000
- [16] S. Ligon, M. Schwentenwein, C. Gorsche, J. Stampfl and R. Liska, "Toughening of photo-curable polymer networks: A review," in Polymer Chemistry, vol. 7, no. 2, Dec. 2015.
- [17] Master Bond Inc., "Evaluating Electrically Insulating Epoxies" (White Paper), in Master Bond Tech Spotlight
- [18] A. Raizer and M. P. Fonseca, "Using a GTEM cell in an interlaboratory comparison of radiated emission," 2017 IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON), Sao Paulo, 2017, pp. 1-4.
- [19] A. Kraetge, S. Hoek, K. Rethmeier, M. Krüger and P. Winter, "Advanced noise suppression during PD measurements by real-time pulse-waveform analysis of PD pulses and pulse-shaped disturbances," 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, San Diego, CA, 2010, pp. 1-6.
- [20] S. Boonpoke and B. Marungsri, "Pattern Recognition of Partial Discharge by Using Simplified Fuzzy ARTMAP," in International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, vol. 4, no. 5, pp. 789-796, 2010.
- [21] M. A. Azirani, P. Werle, A. Akbari, H. Jahangir and J. M. Szczechowski, "An investigation on PRPD patterns generated by the UHF measurement technique for power transformers," 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, 2017, pp. 1144-1147.
- [22] H. Janani and B. Kordi, "Towards automated statistical partial discharge source classification using pattern recognition techniques," in High Voltage, vol. 3, no. 3, pp. 162-169, 9 2018.
- [23] H.M.M.G.T. Herath, J.R.S.S. Kumara, M.A.R.M. Fernando, K.M.K.S. Bandara and I. Serina, "Comparison of supervised machine learning techniques for PD classification in generator insulation," 2017 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Peradeniya, 2017, pp. 1-6.
- [24] B. Raghavendra and M. Krishna Chaitanya, "Comparative analysis and optimal wavelet selection of partial discharge de-noising methods in Gas-insulated Substation," 2017 Third International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), Chennai, 2017, pp. 1-5.