



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

RÉSZKISÜLÉSI FOLYAMATOK VIZSGÁLATA NAGYFREKVENCIÁS ÁRAMVÁLTÓ HASZNÁLATÁVAL

Készítette: Ducsi Gergő

Neptun: Z91H43

Konzulens: Cselkó Richárd, tanársegéd

Németh Bálint, adjunktus

Tartalomjegyzék

| | |
|--|-----------|
| TARTALOMJEGYZÉK | 2 |
| ÖSSZEFOGLALÓ | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| 1 BEVEZETÉS | 5 |
| 2 SZIGETELÉSDIAGNOSZTIKA | 6 |
| 2.1 VILLAMOS IGÉNYBEVÉTELEK | 7 |
| 2.1.1 Vezetés | 8 |
| 2.1.2 Polarizáció | 8 |
| 2.1.2.1 Vezetési és polarizációs folyamatok vizsgálati módszerei | 10 |
| 2.1.3 Átütés | 14 |
| 2.2 TERMIKUS IGÉNYBEVÉTELEK | 15 |
| 3 RÉSZKISÜLÉS VIZSGÁLATOK | 17 |
| 3.1 RÉSZKISÜLÉS MEGHATÁROZÁSI TECHNIKÁK | 19 |
| 3.1.1 Konvencionális mérőáramkörök használata | 19 |
| 3.1.2 Oszcilláló hullámú vizsgálat (Oscillating Wave Test System OWTS) | 20 |
| 3.1.3 Időtartománybeli reflektrometria (Time-Domain Reflectometry TDR) | 21 |
| 3.1.4 Nem villamos módszerek | 21 |
| 3.2 ADATGYÚJTÁS FORMÁI | 22 |
| 4 ONLINE MÉRÉS | 24 |
| 4.1 FELHASZNÁLT ESZKÖZÖK | 24 |
| 4.1.1 Nagyfrekvenciás áramváltó | 24 |
| 4.1.2 Oszilloszkóp | 26 |
| 4.2 MÉRÉSI ADATGYÚJTÁS | 27 |
| 4.2.1 VEE program | 27 |
| 4.2.2 Adatok konvertálása | 31 |
| 4.3 PRÓBAMÉRÉSEK | 33 |
| 5 ÖSSZEGZÉS, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK | 34 |
| ÁBRAJEGYZÉK | 35 |
| IRODALOMJEGYZÉK | 37 |

Összefoglaló

Az elosztói engedélyesek egyre inkább rá vannak kényszerítve, hogy költségeiket csökkentsék. Ez azt eredményezi, hogy a jövőben az elosztóhálózat elemeit azok tervezett életkorának közelében, vagy éppen azt meghaladva kell üzemeltetniük. Annak érdekében, hogy ezt a szolgáltatás minőségének megőrzése vagy akár javítása mellett meg lehessen tenni, ismerni kell a hálózat elemeinek aktuális állapotát, ami segít döntéseket hozni azok karbantartásáról, felújításáról, vagy éppen cseréjéről.

Az utóbbi időben emiatt egyre nagyobb érdeklődés mutatkozik az olyan roncsolásmentes, fejlett diagnosztikai rendszerek iránt, melyek különböző módszerek segítségével statisztikai elemzésre alkalmas adatokat szolgáltatnak. A diagnosztikai eljárások célja, hogy lokalizálják, és kiértékeljék azokat a degradációs folyamatokat, melyek az erősáramú kábelek meghibásodásához vezetnek. A kábelhálózat elemeiről kapott információk feldolgozása összetett feladat, különösen a helyszíni mérések esetében.

A dielektromos mérések (veszteségi tényező, polarizációs spektrum módszerek) eredményei jól tükrözik a kábelszigetelés általános öregedési állapotát, míg a részkisülések a helyi meghibásodásokat képesek kimutatni. Dolgozatom első felében a fenti módszerek értékelésére és együttes alkalmazására koncentrálok.

A részkisülések a szilárd kábelszigetelésekbe nagyfrekvenciás áramot indukálnak. Ez az árnyékoláson keresztül záródó kis áram egy nagyfrekvenciás áramváltó segítségével detektálható. Dolgozatom második felében egy olyan mérésgyűjtő és kiértékelő algoritmus készítését mutatom be, amely egy ilyen nagyfrekvenciás áramváltó által szolgáltatott adatokból statisztikailag használható eredményeket szolgáltat. A rendszer előnye, hogy a kábel kikapcsolása nélkül teszi lehetővé a diagnosztikai méréseket.

Abstract

The distribution license holders are increasingly forced to reduce their operation costs. This means, that in the future the element of the distribution system may have to operate closer to, or even exceeding their maximum lifestyle. In order to make this possible to maintain or even improve the quality of service in addition, they need to determine the current status of the network elements that will help them to make decisions about maintenance, repair or even replace.

In recent years growing interest in non-destructive and advanced diagnostic systems resulted in several diagnostic methods with output data suitable for statistical analysis. The aim of the diagnostic methods to locate and evaluate the degradation processes that lead to the failure of power cables. Analysis of diagnostic data of power cables especially from on-site measurement is a complex process.

The result of the dielectric measurements (dielectric losses, polarization spectrum methods) reflect the general aging condition of the cable insulation and the PD (partial discharge) processes are able to detect the local faults. In the first half of my thesis I focus on the evaluation and combined use this methods.

Partial discharge activity in solid insulation induces small high frequency currents in the earth of the electrical system. They can be detected, using a high frequency current transformer. In the second half of my thesis I presented a measurement acquisition and analysis algorithm which provides statistically useful data supplied by a high frequency current transformer. The main advantage of this system is to allow the diagnostic test without turning off the cable.

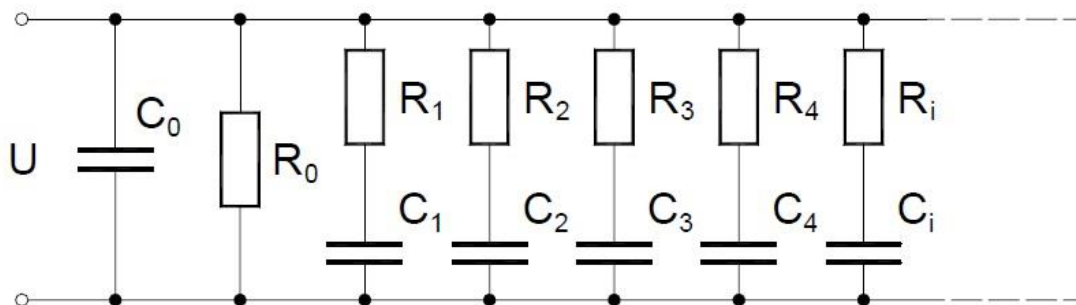
1 Bevezetés

A villamosenergia átviteli és elosztó hálózatban manapság nagy szerepet játszanak az erősáramú kábelek. Ennek a kábelhálózatnak az üzemeltetése jelentős pénzügyi beruházást igényel, hiszen rendkívül megbízhatónak kell lennie a várható élettartam előtti meghibásodások okozta bevétel kiesések csökkentése miatt. Gyakran előfordul, hogy költségcsökkentés miatt ezeket a kábeleket az előre tervezett élettartam közelében, vagy éppen azt meghaladva üzemeltetik. Ennek eredménye képpen az üzemeltetőknek olyan döntéseket kell meghozniuk, melyek a kábelhálózat karbantartását, javítását vagy éppen cseréjét érintik. Ezen döntések meghozatalához szükséges ismernünk a kábelszigetelések aktuális állapotát. A diagnosztikai eljárások célja, hogy lokalizáljuk azokat a degradációs folyamatokat, melyek meghibásodáshoz vezetnek. Léteznek roncsolásos, és roncsolásmentes eljárások, melyeket el lehet végezni a helyszínen, vagy laboratóriumi körülmények között. A tesztek során a szigetelések azon tulajdonságait lehet vizsgálni, melyek az öregedéshez kapcsolódnak. Leginkább olyan módszereket célszerű alkalmazni, melyek azokat a tulajdonságokat vizsgálják, amik többé-kevésbé lineárisan változnak az idő függvényében, így megfelelően lehet előre jelezni a meghibásodást.

Több különböző roncsolásmentes diagnosztikai eljárás létezik, melyeket kábelszigetelések állapotának meghatározására használnak. Először röviden bemutatom ezeket az eljárásokat, majd külön kitérek az úgynevezett online részkisülés vizsgálatra, melynek lényege, hogy egy nagyfrekvenciás áramváltó használatával a kábelek árnyékolásában keletkező kis áramokat detektáljuk, és ezek segítségével vizsgáljuk a részkisülési folyamatokat. Ennek a módszernek a nagy előnye, hogy a kábelek üzemszerű működése mellett, azok kikapcsolása nélkül lehet vizsgálni a szigetelések állapotát. Ezután bemutatok egy eljárást, mely során egy moduláris oszcilloszkóp memóriájának tartalmából statisztikailag is - nem csak egyedi kiértékelésre- használható adatokat lehet kapni.

2 Szigetelésdiagnosztika

A szigetelések legfontosabb feladata az üzemszerűen vagy időszakosan különböző potenciálon lévő vezető részek egymástól való elszigetelése, egymáshoz való térbeli helyzetük rögzítése. A szigetelőanyagok legfontosabb tulajdonsága a villamos szilárdságuk. Az üzem közben fellépő igénybevételek miatt a szigetelőanyagok szerkezete megváltozhat. A két legfontosabb romlási folyamat az öregedés, és a nedvesedés. A kémiai, mechanikai és villamos tulajdonságok visszafordíthatatlan megváltozását nevezzük öregedésnek.



1. ábra: Szigetelőanyagok helyettesítő kapcsolása

A magyarországi kábelhálózaton az egyik legelterjedtebb szigetelőanyag típus az olaj-papír szigetelés. A kábel eret olajjal átitatott papírral tekerik be több rétegben. Egyre elterjedtebbek az extrudált szigetelésű (térhálósított polietilén (XLPE)) kábelek, melyek olcsóbbak, és egyszerűbben összeszerelhetők, mint az olaj-papír szigetelésű kábelek.

Üzem közben a szigetelések különböző igénybevételeknek vannak kitéve:

- környezeti igénybevételek,
- hőigénybevétel,
- villamos igénybevétel.

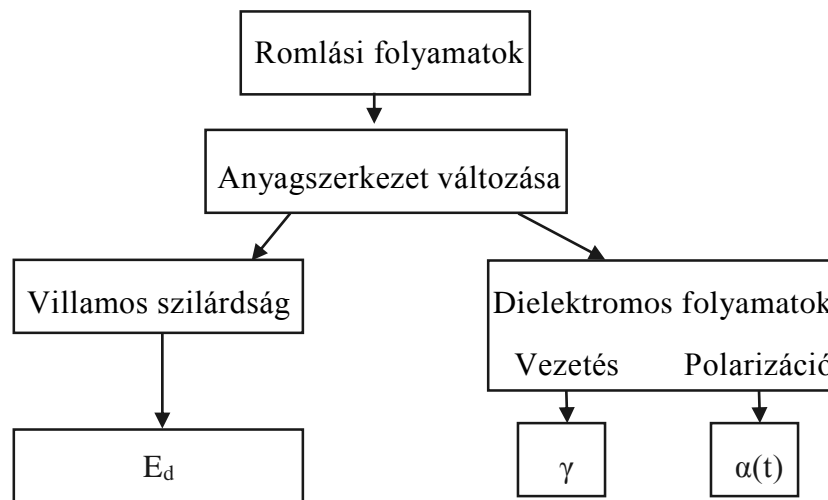
Ezek során fizikai és kémiai folyamatok zajlanak le. Kémiai folyamatok például az oxidáció, depolimerizáció vagy a főként PVC szigeteléseknél megfigyelhető sósavlehasadás. A fizikai folyamatok lehetnek mechanikaiak (nedvesedés, töredezés), vagy villamosak (treeing, részkisülések). A diagnosztikai

eljárásokat két nagy csoportba lehet sorolni: roncsolásos, és roncsolásmentes vizsgálatok.

A roncsolásos vizsgálatok mintavétellel járó eljárások, melyek során a mintával különböző mechanikai (rugalmasság, sűrűség, keménység) és kémiai vizsgálatokat (polimerizációs fok, Fourier transzformációs infravörös spektroszkópia, OIT) végeznek. Ide soroljuk az átütési vizsgálatokat is, hiszen a szigetelőanyag villamos tulajdonságai az átütés következtében leromlanak.

Roncsolásmentes eljárás például a dielektromos jellemzők vizsgálata ($\tan \delta$, visszatérő feszültség mérése, dielektromos spektroszkópia), a feszültségpróba vagy a részleges kisülések vizsgálata. A feszültségpróba célja, hogy megvizsgáljuk egy adott szigetelés villamos szilárdságát, hogy az egy adott érték felett van-e.

2.1 Villamos igénybevételek



2. ábra: Villamos vizsgálati módszerek alapja

Villamos térerősség hatására egy szigetelőanyagban, annak öregedése miatt, különféle villamos folyamatok indulhatnak meg. Ha ez a villamos térerősség az anyag villamos szilárdságánál alacsonyabb, akkor a 2. ábrán is látható alapvető dielektromos folyamatok jöhetnek létre, a vezetés és a polarizáció. Ha a térerősség meghaladja az anyag villamos szilárdságát, akkor az elektródok között létrejön a villamos ív, - plazma álagú levegő – és átütés következik be.

2.1.1 Vezetés

A szigetelőanyagok nem tökéletes szigetelők, szigetelési ellenállásuk nem végtelen, bennük nagyon kis értékű áram folyhat, amit a térerősség hatására elmozduló szabad töltéshordozók okoznak. Ezek a töltéshordozók a térerősség megszűnését követően nem vándorolnak tovább. A vezetési folyamat erőssége két mennyiséggel jellemezhető:

- egységnyi térfogatra vonatkoztatott γ fajlagos térfogati vezetőképességgel [A/Vcm],
- ennek reciprokjával, a ρ fajlagos térfogati ellenállással [$\Omega \cdot \text{cm}$].

A vezetés nagymértékben függ a hőmérséklettől, hiszen nagyobb hőmérsékleten a vezetést okozó töltéshordozók gyorsabban mozognak. A legtöbb szigetelőanyag esetében igaz az alábbi hőmérséklet összefüggés:

$$\gamma = A * e^{-B/T} \quad (1)$$

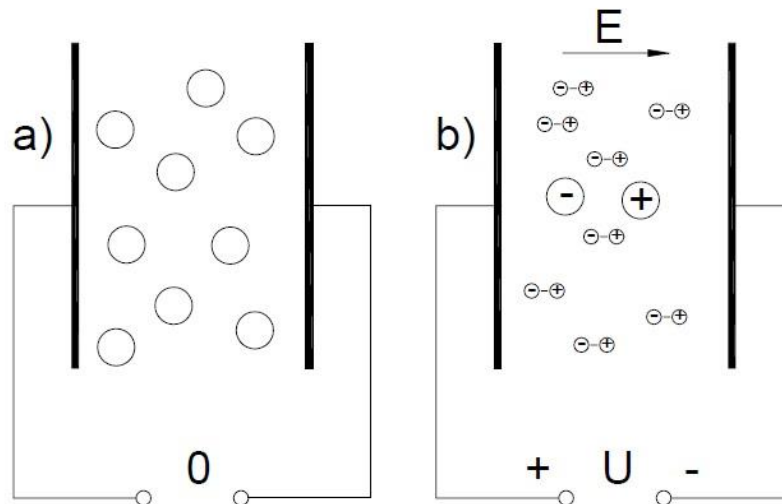
Az (1) egyenletben szereplő jelölések:

- γ a fajlagos vezetőképesség [A/Vcm]
- A és B a szigetelőanyagra jellemző állandók,
- T hőmérséklet [K]. [2]

2.1.2 Polarizáció

A vezetési folyamattól eltérően polarizáció esetében a töltéshordozók nem haladnak keresztül a szigetelőanyag teljes hosszában egyik elektródtól a másikig, hanem villamos erőtér hatására nyugalmi helyzetükből tolódnak el, majd az erőtér megszűnése után ebbe a nyugalmi helyzetbe állnak vissza.

A szigetelőanyagok kifelé semleges töltésűek, viszont belsejükben vannak pozitív és negatív töltéssel rendelkező részecskék is, amik erőtér hiányában kiegyenlítik egymást. Erőtér hatására viszont az anyag dipólussá változik (3. ábra).



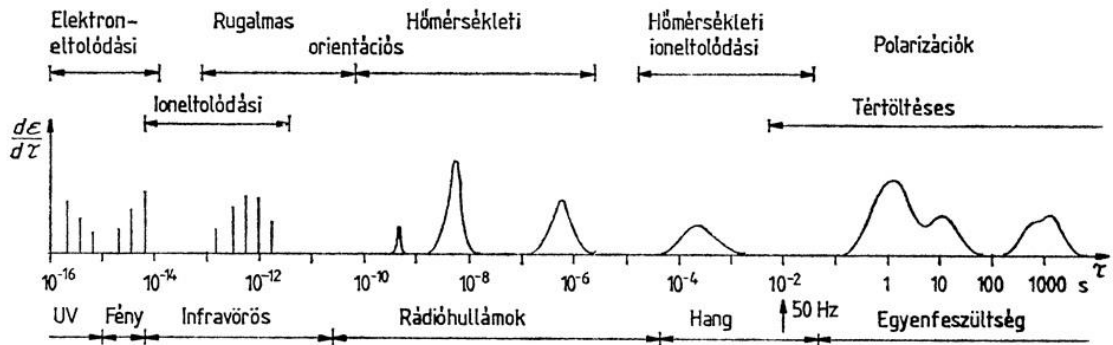
3. ábra: Semleges (a) és polarizálódott (b) szigetelőanyag [2]

Attól függően, hogy mekkora a polarizációt létrehozó töltések nagysága és sűrűsége, különböző elmozdulási időállandók adódnak. Ezek az időállandók a 10^{-14} - 10^4 s tartományban mozognak. Egy szigetelőanyagban egyszerre több fajta polarizáció alakulhat ki (1. táblázat)

| Polarizáció fajtája | Időállandó τ [s] |
|-------------------------------|--------------------------|
| Elektroneltolódási | $10^{-16} - 10^{-14}$ |
| Ioneltolódási | $10^{-13} - 10^{-12}$ |
| Hőmérsékleti ioneltolódási | $10^{-4} - 10^{-2}$ |
| Rugalmas orientációs | $10^{-13} - 10^{-12}$ |
| Hőmérsékleti orientációs | $10^{-10} - 10^{-6}$ |
| Határreteg | $10^{-3} - 10^3$ |
| Tértöltéses | $10^{-3} - 10^3$ |

1. táblázat: Polarizáció fajtái és időállandói

Ezekből az időállandókból felrajzolható a polarizációs spektrum (4. ábra).



4. ábra: A polarizációs spektrum [2]

A különböző időállandójú polarizáció fajtákat különböző módszerekkel lehet vizsgálni. A leggyorsabb folyamat infravörös abszorpciós színekép-elemzéssel vizsgálható. Ebben a tartományban keletkeznek a szerves szigetelőanyagokban a gyökök lehasadása. A következő tartomány $10^{-10} - 10^{-1}$ s-ig terjed, melyet veszteségi tényező mérésével lehet vizsgálni. Az ennél nagyobb időállandóval rendelkező folyamatokat egyenfeszültség ugrásra adott feszültségválaszból állapítják meg.

2.1.2.1 Vezetési és polarizációs folyamatok vizsgálati módszerei

A szigetelésben létrejövő vezetési és polarizációs folyamatokat roncsolásmentesen a dielektromos jellemzők mérésével lehet vizsgálni. Az alábbi jellemzők méréséből következtetni lehet a szigetelőanyag állapotára:

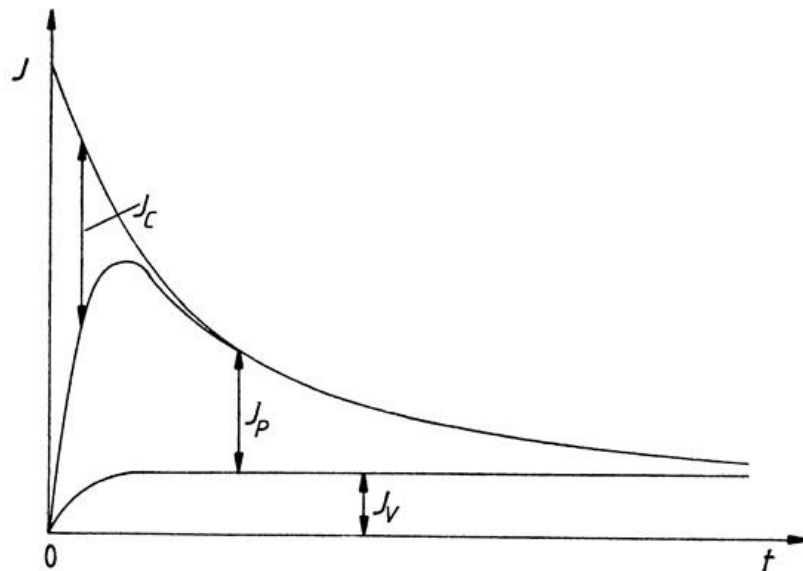
- Szivárgási áram vagy szigetelési ellenállás mérése: a vizsgálandó szigetelést egyenárammal töltik, és különböző időpontokban regisztrálják a mért áramot vagy ellenállást. A szivárgási áram három komponensből tevődik össze: kapacitív töltőáram (J_c), polarizációs áram (J_p) és a vezetési áram (J_v). A mért áramsűrűségekből számolni lehet a fajlagos vezetőképességet, a polarizációs vezetőképességet, az abszorpciós tényezőt és a polarizációs indexet (2. táblázat).

| Fajlagos vezetőképesség | Polarizációs vezetőképesség | Abszorpciós tényező | Polarizációs index |
|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| $\gamma = \frac{J(\infty)}{E}$ | $\beta = \frac{J(0) - J(\infty)}{E}$ | $K_A = \frac{J(15'')}{J(60'')}$ | $PI = \frac{J(1')}{J(10')}$ |

2. táblázat: A fajlagos vezetőképesség és a polarizációs vezetőképesség számítása a szivárgási áramból

A táblázatban szereplő jelölések:

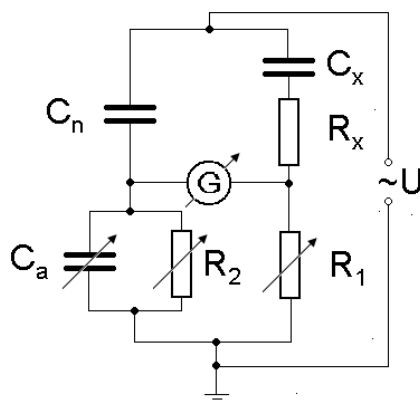
- γ : fajlagos vezetőképesség [A/Vcm],
- $J(\infty)$: állandósult áramsűrűség,
- E : villamos térerősség,
- $J(0)$: kezdeti áramsűrűség,
- K_A : abszorpciós tényező,
- $J(15'')$: 15 másodperces áramsűrűség értéke,
- $J(60'')$: 1 perces áramsűrűség,
- $J(1')$: 1 perces áramsűrűség,
- $J(10')$: 10 perces áramsűrűség.



5. ábra: A szivárgási áram összetétele [3]

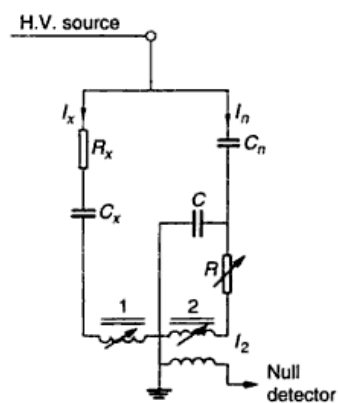
- Veszteségi tényező mérése: egy valós dielektrikumban folyó kis értékű áramnak két része van: egy kapacitív áram, és egy ohmos összetevő. Az áram hatására dielektromos veszteség keletkezik, ami a veszteségi tényezővel, vagy más néven $\tan \delta$ -val jellemezhető. A veszteségi tényező értéke függ a hőmérséklettől, a szigetelés anyagától, öregedésétől, stb.. A gyakorlatban elterjedt mérési módszerek a különböző mérőhidak használata. Ilyen mérőhíd például a Schering-híd vagy a Glynne-híd.

Schering-híd



$$\tan \delta = \omega * R_2 * C_a$$

Glynne-híd

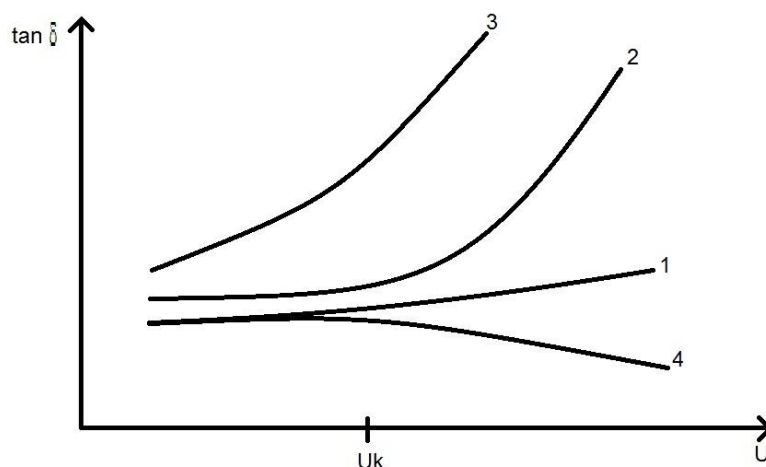


$$\tan \delta = \omega * R(C_n + C)$$

6. ábra: Schering-híd és a Glynne-híd [3]

Mind a két mérési elrendezés azonos elven alapul. Középen található egy galvanométer, ami segít a kiegyenlítettség ellenőrzésében. A C_x és az R_x elemek reprezentálják a vizsgálandó szigetelést.

Megfelelő állapotú szigetelés esetében a feszültség növelésével a veszteségi tényező közel változatlan marad (7. ábra 1. görbe). A 2. függvény részkisülések jelenlétére utal, a 3. egy elnedvesedett szigetelőt mutat. A 4. függvény egy előregedett szigetelő veszteségi tényező változása a feszültség függvényében.

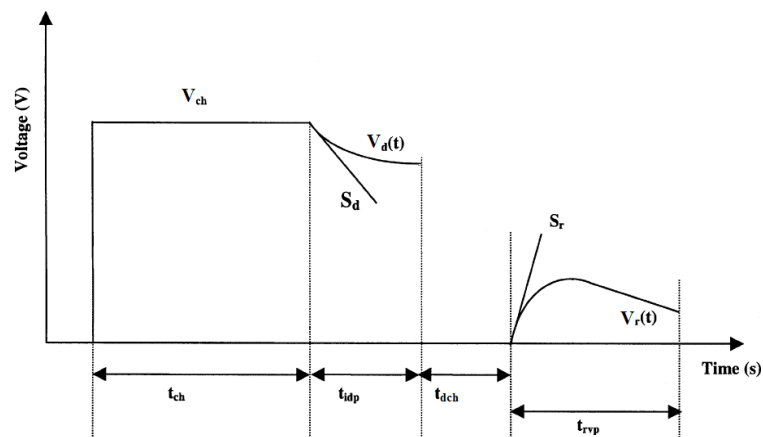


7. ábra: Veszteségi tényező a feszültség függvényében

- Teljes feszültségválasz mérése: a módszer a kisülési és a visszatérő feszültség mérésén alapul. A szigetelést először feltöltik

egyenfeszültséggel, majd a forrást leválasztják. Ekkor a töltések a szigetelés ellenállásán egyenlítődnek ki, a feszültség csökkenni fog. Így mérhető a kisülési feszültség görbéje. A folyamat magyarázható a szigetelések helyettesítő képével: a geometriai kapacitás a szigetelési ellenálláson keresztül kisül.

Ezután a feltöltött szigetelést rövidre zárják egy rövid ideig. Miután a rövidzár megszűnt, a szigetelésben létrejövő polarizációs folyamatok következtében mérhető lesz a visszatérő feszültség görbéje. A szigetelőanyagok helyettesítő képével az alábbi módon magyarázható: a rövidre zárás alatt a geometriai kapacitás, valamint a kis időállandókhöz tartozó kapacitások kisülnek, majd a rövidzár megszűnése után a nagyobb időállandókhöz tartozó kapacitások tölteni kezdik a kisült kondenzátorokat. Később a szigetelési ellenálláson keresztül az összes kondenzátor kisül, a feszültség lecseng. A teljes feszültségválasz módszer feszültségviszonyai a 8. ábrán látható. Előnye, hogy a két dielektromos folyamat egymástól függetlenül vizsgálható.



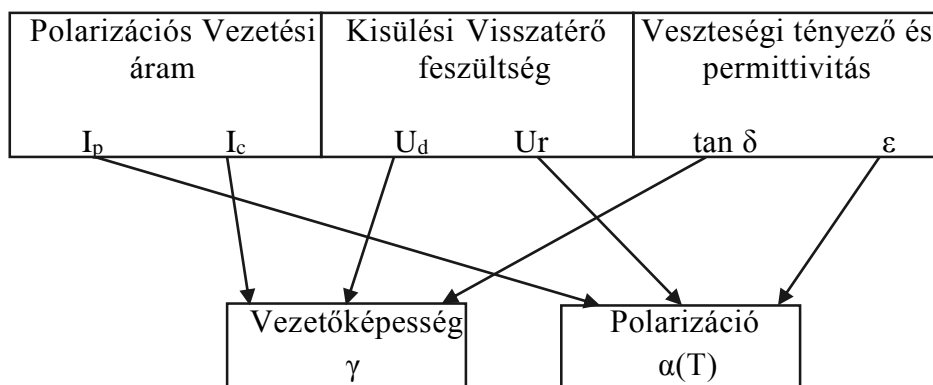
8. ábra: Teljes feszültségválasz feszültségviszonyai [3]

A kisülési feszültség kezdeti meredekségéből (S_d) a vezetőképességet, a visszatérő feszültség kezdeti meredekségéből (S_r) pedig a polarizációs vezetőképességet lehet számolni.

| | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Fajlagos vezetőképesség | Polarizációs vezetőképesség |
| $\gamma = S_d * \epsilon_0 / V_{ch}$ | $\beta = S_r * \epsilon_0 / V_{ch}$ |

3. táblázat: A fajlagos vezetőképesség és a polarizációs vezetőképesség számítása a kezdeti meredekségekből

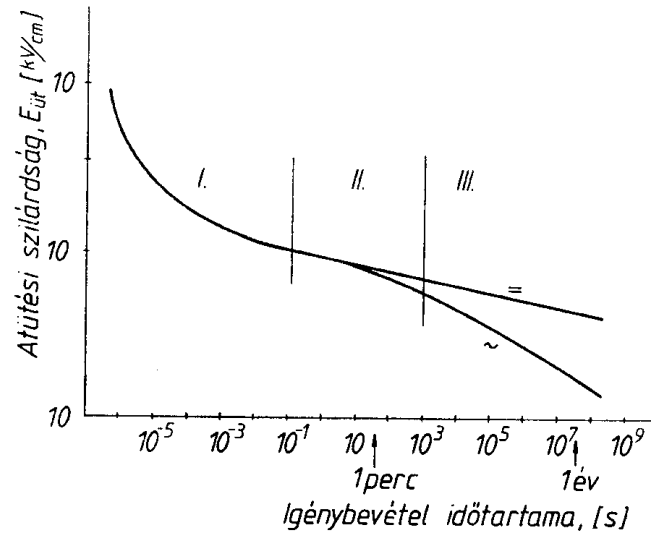
A polarizációs és vezetési folyamatok jellemzésére használt vizsgálati módszereket, valamint a mért mennyiségek és a dielektromos folyamatok közötti kapcsolatot mutatja be a 9. ábra.



9. ábra: Vizsgálati módszerek a dielektromos folyamatok jellemzésére [4]

2.1.3 Átütés

Ha egy szigetelésre, annak villamos szilárdságánál nagyobb térerősséget kapcsolunk, akkor létrejön az elektródák között a villamos ív, vagyis átütés keletkezik a szigetelőanyag belsejében. Ha ez a közeg gáz vagy folyadék, akkor a villamos ív kialakása után a szigetelőanyag villamos szilárdsága visszaáll az eredeti értékre. Szilárd anyagok esetében viszont az átütés minden esetben maradandóan roncsolja a szigetelést.



10. ábra: Szilárd szigetelőanyagok villamos szilárdságának változása az igénybevétel időtartamának függvényében [2]

A 10. ábrán megfigyelhető görbe 3 részre osztható. Az első tartományra a villamos átütés jellemző, a másodikra pedig a hővillamos átütés. A második tartományban megfigyelhető, hogy különválnak a váltakozó-, és az egyenfeszültségű eset. Ez azzal magyarázható, hogy váltakozófeszültségen nagyobb a dielektromos veszteség, és ez által kisebb az átütési szilárdság. A 3. szakasz a villamos öregedés tartománya. Ebben a szakaszban a tartós üzemi igénybevételek hatására végbemenő folyamatok okozzák az átütési szilárdság csökkenését.

Az átütés egyik fajtája a részleges kisülés, amely során az anyag csak helyileg veszíti el villamos szilárdságát. A részkisülés folyamatával a következő fejezetben foglalkozom.

2.2 Termikus igénybevételek

A szigetelést érő hőigénybevétel az egyik legfontosabb öregedést befolyásoló tényező. Magas hőmérsékleten megnő a kémiai reakciók sebessége, ami a szerves szigetelőanyagok fő öregedési mechanizmusa. Az olaj-papír szigetelésű kábelek degradációjának sebessége a jól ismert Arrhenius összefüggéssel számolható:

$$k = k_{max} * e^{-\frac{E_a}{k_B * T}} \quad (2)$$

A (2) egyenlet jelölései:

- k reakciósebességi állandó [1/s],
- k_{max} anyagtól függő állandó,
- E_a aktivációs energia,
- k_B Boltzmann-állandó,
- T abszolút hőmérséklet.

A szigetelőanyagokat hőállósági osztályokba lehet sorolni attól függően, hogy 20000 órányi igénybevételt mekkora hőmérsékleten képes elviselni az anyag. A hőállósági osztályokat, azok maximális hőmérsékletét valamint a jellemző anyag típusait a következő táblázat foglalja össze:

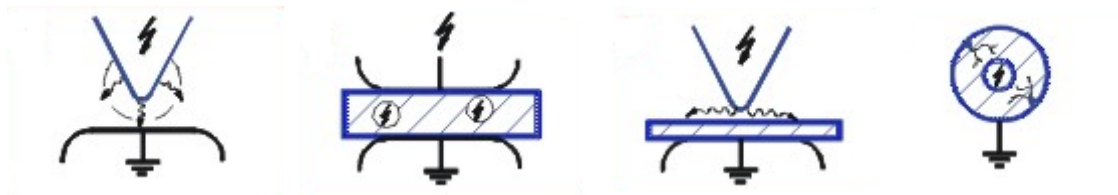
| Hőállósági osztály | Legnagyobb üzemi hőmérséklet [°C] | Anyagok |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| <i>Y</i> | 90 | Papír, selyem, PVC, polietilén |
| <i>A</i> | 105 | Papír és selyem olajban, műgumik |
| <i>E</i> | 120 | Bakelit, poliamid gyanták |
| <i>B</i> | 130 | Szervetlen anyagokból készült anyagok |
| <i>F</i> | 155 | Lakkokkal telített üvegszövet |
| <i>H</i> | 180 | Szilikonok, gyanták |
| <i>C</i> | >180 | Csillám, üveg, porcelán |

4. táblázat: Szigetelők hőállósági osztályai, és azok jellemző anyagai

3 Részkisülés vizsgálatok

Részletörésről tehát akkor beszélünk, ha a szigetelőanyag csak helyileg veszíti el átütési szilárdságát, a letörés nem ér elektródától elektródáig. Használatos megnevezés még a részkisülés, vagy a részleges kisülés fogalmak is. A folyamat lejátszódhat szilárd, folyékony és gáz halmazállapotú anyagokban is. Négy különböző alaptípust különböztetünk meg:

- koronakisülés,
- üregkisülés,
- felületi kisülés,
- treeing.



11. ábra: Részkisülések alaptípusai: koronakisülés, üregkisülés, felületi kisülés, treeing [5]

A részkisülések ugyan nem hidalják át a teljes elektródaközt, viszont magas hőmérsékletük miatt folyamatosan roncsolják a szigetelőanyagot. Olyan eset is előfordulhat, hogy a folyamatnak az anyag degradálásában nincs nagy szerepe, viszont más hibák kimutatására tökéletesen alkalmas. Például jelzi, ha egy több rétegű szigetelés rétegei egymástól elválnak.

Ott, ahol a részletörés megjelenik, az ionozási folyamatok révén, az elektródákon áramimpulzus jelenik meg. Ennek az impulzusnak a részkisülés helyén rövid a felfutási ideje, és ahogy terjed a kábelben, a diszperzió következtében növekszik ez a felfutási idő, így számolni lehet a hiba helyét. A terjedés során az impulzus energiát veszít. Ez az energiaveszteség kifejezhető a távolság és a frekvencia függvényében:

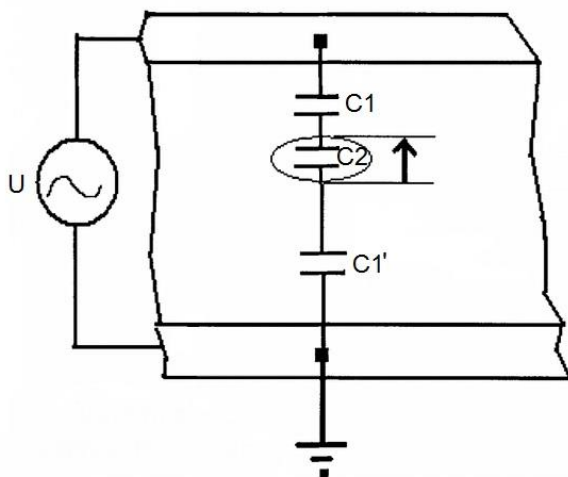
$$\kappa(z, f) = e^{-\alpha(f)z}, \quad (3)$$

ahol:

- κ : energiaveszteség,
- z : távolság,
- f : frekvencia,
- α : frekvenciafüggő csillapítási együttható [$\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$]. [7]

A részkisülések két, egymással ellenkező irányba haladó impulzust keltenek. Az impedanciák függvényében ezek az impulzusok reflektálódhatnak, ami ronthatja az érzékelést. Ezért szükséges, hogy a részkisülés forrásának megállapításakor ezeket a reflexiókat figyelembe vegyük.

Az üregkisülés folyamata a 12. ábra segítségével magyarázható el. Középen található a zárvány, melyet $C2$ kapacitással lehet leképezni. Ennek az üregnek a permittivitása ε_2 . Körülötte az ε_1 permittivitású szigetelőanyag helyezkedik el. Az ε_2 kisebb ε_1 -nél. Az U feszültségforrás bekapcsolásával az üregben megjelenik egy E nagyságú térerősség. Ha növeljük a feszültséget, akkor a térerősség is nőni fog az üregben addig, amíg el nem éri a kitöltő anyag átütési szilárdságát. Mivel $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$, csak az üregben fog létrejönni átütés, az elektródák között nem. Miután a töltésáramlás következtében az átütés megszűnik, a folyamat kezdődik előlről.



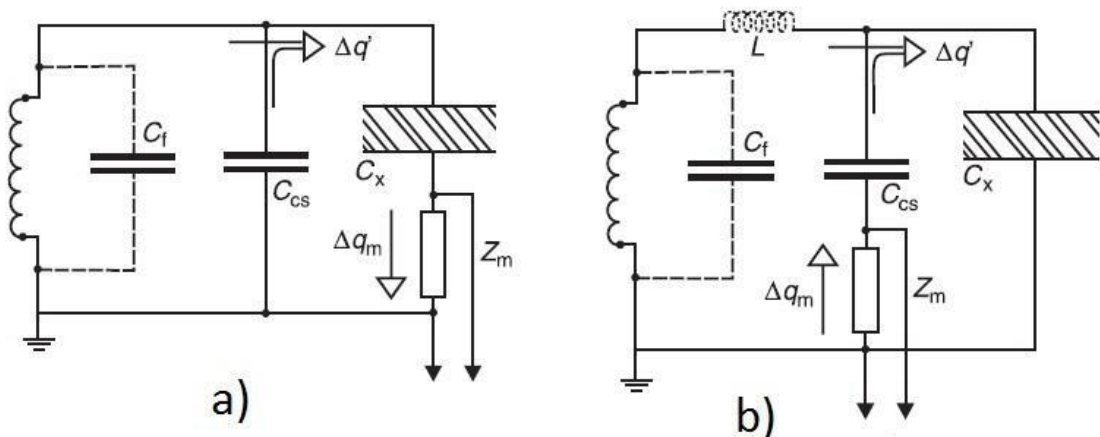
12. ábra: Üregkisülés helyettesítő képe

3.1 Részkisülés meghatározási technikák

A kábelhálózatokon keletkező részletörések észlelésére több különböző elven alapuló technikát használnak. A következőkben ismertetem a legelterjedtebb módszereket.

3.1.1 Konvencionális mérőáramkörök használata

A legelterjedtebb elrendezések a soros és a párhuzamos vizsgálóáramkörök. Mind a két típusnál található csatolókapacitás, mérőimpedancia, próbatest és egy transzformátor. A próbatestben keletkező részletörések hatására egy $\Delta q'$ töltésű áramimpulzus keletkezik, a töltéskülönbség kiegyenlítésére. Ez az áram keresztül folyik a mérőimpedancián, és ennek nagyságából következtetni lehet a részkisülés mértékére.



13. ábra: Hagyományos részkisülés vizsgáló áramkörök: soros (a) és párhuzamos (b) [3]

A soros elrendezést csak olyan szigetelések vizsgálatára használható, melyek a földtől elszigeteltek. A párhuzamos kapcsolásban a mérőimpedancia van párhuzamosan kapcsolva a vizsgált szigeteléssel. Ebben az áramkörben található még egy fojtótekerics is, ami azt biztosítja, hogy az áramimpulzus teljes egészében a mérőimpedancián haladjon keresztül.

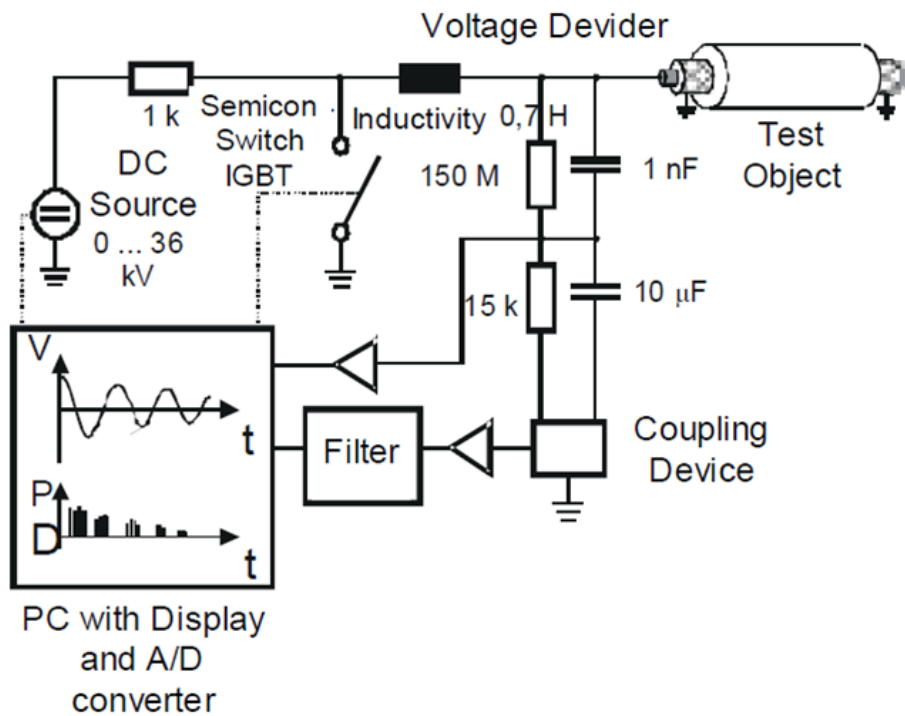
3.1.2 Oszcilláló hullámú vizsgálat (*Oscillating Wave Test System OWTS*)

A rendszer előnye, hogy lehetővé teszi a helyszíni vizsgálatokat, melyek viszonylag rövid ideig tartanak (~1 óra), valamint kompakt, a vizsgálati helyek között könnyen mozgatható. Felépítését tekintve egy egyenáramú nagyfeszültségű tápforrásból, félvezető kapcsolóból, feszültségosztóból és egy induktív tekercsből áll. Továbbá tartozik még hozzá egy ipari számítógép is, mely a mérő és elemző funkciókat látja el.

Első lépésben a próbatárgyat egyenfeszültséggel töltik fel néhány másodpercig, amíg el nem éri az üzemi feszültség szintet. Ekkor zárják a félvezető kapcsolót, ami a tápforrást leválasztja. Így létrejön egy tekercsből és egy kondenzátorból álló soros rezgőkör. Az áramkör az elemek által meghatározott rezonanciafrekvencián kezd el oszcillálni:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L*C}}, \quad (4)$$

A tekercs értékét úgy kell megválasztani, hogy a kialakuló frekvencia közel azonos legyen az üzemi frekvenciával (50Hz). Egy mérőáramkör érzékeli az oszcilláló hullám hatására keletkezett részkisüléseket. A rendszer használatával a részletörések helye is meghatározható vándorhullám módszerrel. A feszültség- és áramértékek méréséhez és kijelzéséhez A/D átalakítókat használnak.



14. ábra: Az oszcilláló hullámú vizsgálat áramköri felépítése [3]

3.1.3 Időtartománybeli reflektrometria (*Time-Domain Reflectometry TDR*)

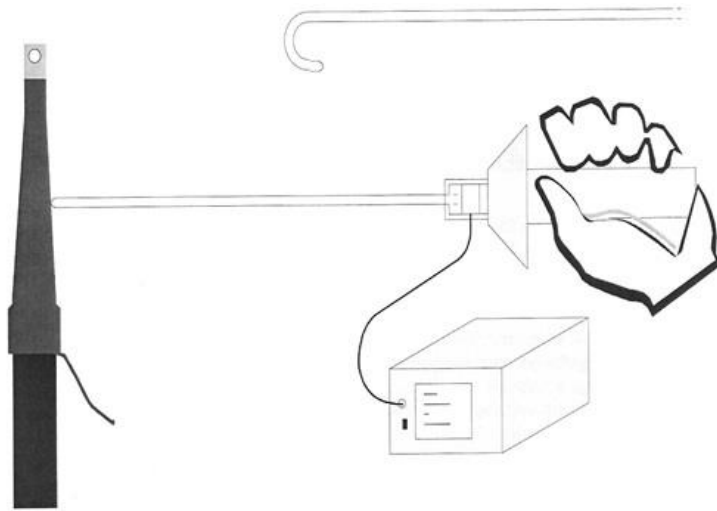
A vizsgálat során egy rövid felfutási idejű impulzust indítanak el a vezetőben. Ez az impulzus végighalad a kábelben, majd a lezáró impedancia függvényében visszaverődik. Ha a terjedése során egy megváltozott hullámimpedanciájú ponthoz érkezik a hullám, akkor ezen a diszkontinuitási ponton reflexió keletkezik. A visszavert hullám alakjából, nagyságából, a visszaverődés idejéből és a jelterjedés idejéből számítható a diszkontinuitási pont távolsága a jelforrástól.

3.1.4 Nem villamos módszerek

A részletörések mérését nem villamos módszerek használatával is el lehet végezni.

- Optikai vizsgálat: a részkesülés során az elektronok gerjesztett állapotba kerülnek. Amikor ez az állapot megszűnik, az elektronok az energiájukat elsugározzák, ami nagyrészt az UV fény tartományába esik. A kibocsátott fény spektruma információt ad arról, hogy a részkesülés milyen közegben keletkezett.

- Akusztikus vizsgálat: a részkisülések hőmérsékletemelkedést okoznak, melyek mechanikai hullámokat keltenek. Ezeket a hullámokat akusztikus érzékelővel detektálni lehet. A hullámok amplitúdója arányos a kisülés energiájával. Nagy előnye, hogy érzéketlen az elektromágneses zavarokra. Segítségével a leggyakoribb szerelési hibák detektálhatók.

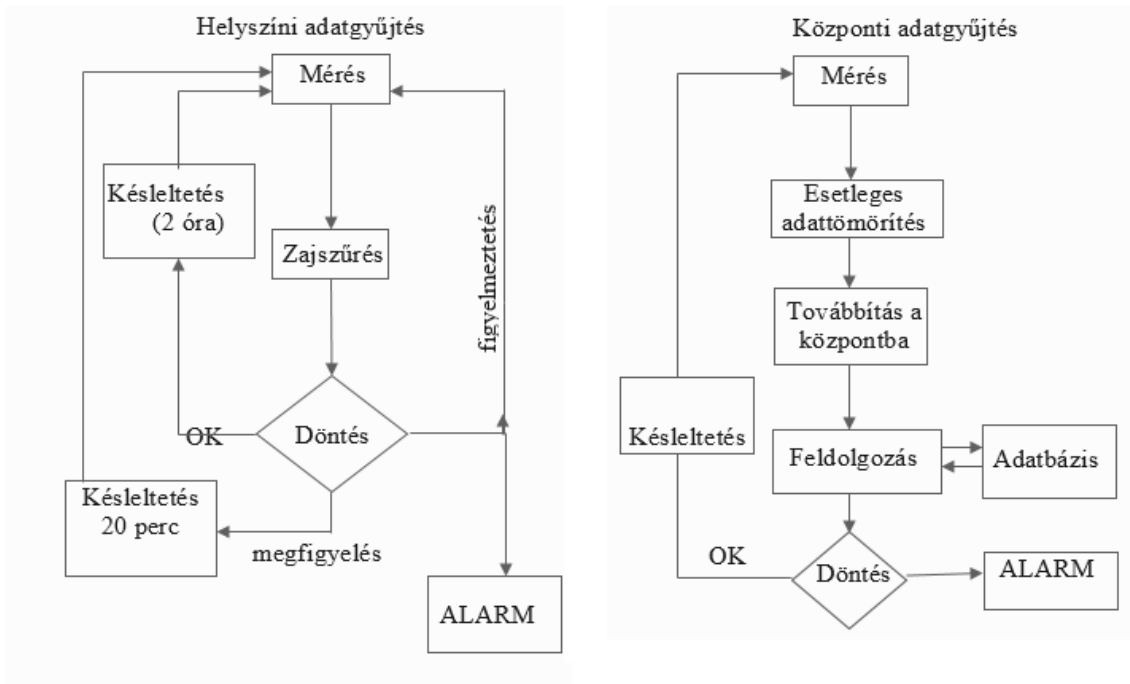


15. ábra: Akusztikus vizsgálat mérési elrendezése [3]

3.2 Adatgyűjtés formái

A részkisülési mérések során begyűjtött adatok feldolgozásának két fajtáját különböztetjük meg: a helyszíni és a központi adatfeldolgozást. Helyszíni mérés során először zajszűrést kell végezni, majd el kell dönteni, hogy a mért értékek helyesek-e. Három választás van. Ha minden rendben van, akkor ~2 óra után meg kell ismételni a mérést. Ha vannak hibára utaló jelek, de azok nem mértékadóak, akkor kicsit hamarabb kell elvégezni az újabb mérést. A harmadik út az, amikor egyértelműen detektálható a hiba. Ekkor hibaüzenetet kell küldeni.

Központi mérés esetén a mért és tömörített adatokat továbbküldve a központba, azok feldolgozásra kerülnek. Ekkor egy adatbázissal össze kell vetni a kapott eredményeket, majd ezeket ki kell értékelni, hogy van-e hiba. Ha nincs, akkor bizonyos idő múlva meg kell ismételni a mérést. Ha detektálható a hiba, akkor itt is egy hibaüzenetet kell küldeni. Az 5. táblázat összehasonlítja a két fajta mérés előnyeit és hátrányait.



16. ábra: A helyszíni és a központi adatfeldolgozás

| | Helyszíni adatgyűjtés | Központi adatgyűjtés |
|------------------|--|--|
| Előnyök | kevés adat | van egy központi adatbázis, ami a korábbi értékeket tárolja, így azokkal összehasonlítható a beérkezett adat; könnyen frissíthető, nem kell kimenni minden egyes helyszínre |
| Hátrányok | nem lehet hihetőségi vizsgálatot készíteni; a rendszer frissítése esetén nem lehet azt központilag elvégezni, ki kell menni a helyszínre; | a nagy adatmennyiséget kell továbbítani |

5. táblázat: A helyszíni és a központi adatgyűjtés előnyei és hátrányai

4 Online mérés

Az online mérések lényege, hogy a vizsgálatokat a kábelek kikapcsolása nélkül, üzem közben lehet elvégezni. A részkisülés érzékelőket, melyek általában nagyfrekvenciás áramváltók, a vizsgálandó kábelek árnyékolásának kivezetésére kell csatlakoztatni. Lehetőség van még TEV (*Transient Earth Voltage*) és AA (*Airborne Acoustic*) szenzorok elhelyezésére is. A TEV szenzorok a kapcsolókészülékekben, transzformátorokban, kábelvégelzárókban keletkező belső részkisülések (4MHz - 100MHz) detektálására alkalmasak. Ezeket a vizsgálandó berendezések külső felszínére kell felhelyezni. Az AA szenzorok, például légszigetelésű kapcsolókészülékekben keletkező külső részkisülések (40kHz) érzékelését végzik. A részkisülés mérő szenzorokat koaxiális kábellel lehet a csatlakoztatni a monitoring rendszerhez.

A nagyfrekvenciás áramváltók használatával körülbelül 30MHz -ig lehet kiterjeszteni a mérés felső frekvenciahatárát, amivel kedvező jel-zaj viszonyt lehet elérni.

4.1 Felhasznált eszközök

A dolgozatom készítése során a vizsgálatokhoz egy HVPD 100/50 típusú áramváltót és egy Agilent U2702A típusú moduláris oszcilloszkópot használtam.

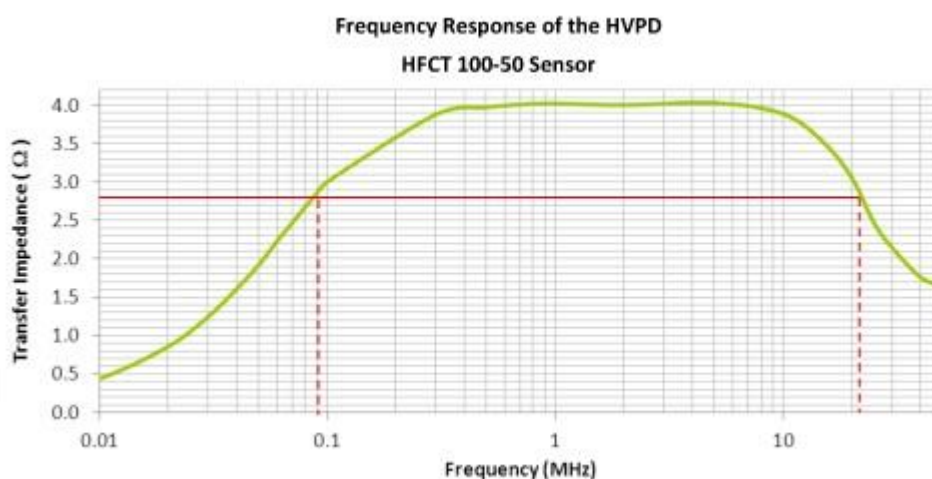
4.1.1 Nagyfrekvenciás áramváltó

A HVPD 100/50-es érzékelő egy közepes méretű, osztott magos nagyfrekvenciás áramváltó, amely közép-, és nagyfeszültségű kábelek online részkisülés vizsgálatára alkalmas. Belső átmérője 46 mm , osztott vasmagjának köszönhetően könnyen csatlakoztatható a kábelek árnyékolásának kivezetésére. Teljesítményét tekintve a legfontosabb tulajdonsága a transzfer impedancia ($[mV/mA]$) értéke. Egy megfelelően beállított áramváltóval akár pC nagyságrendű részkisülések keltette áramok is érzékelhetők. Az átviteli impedancia az áramváltó adott körülmények közötti érzékenységét adja meg.



17. ábra: HVPD 100/50-es áramváltó [10]

A HVPD 100/50-es áramváltót úgy tervezték meg, hogy a frekvenciatartomány 90kHz -től 21MHz -ig terjedő szakaszán a transzfer impedancia lapos karakterisztikát ($3,8\text{-}4,3\text{ mV/mA}$) mutasson (18. ábra).

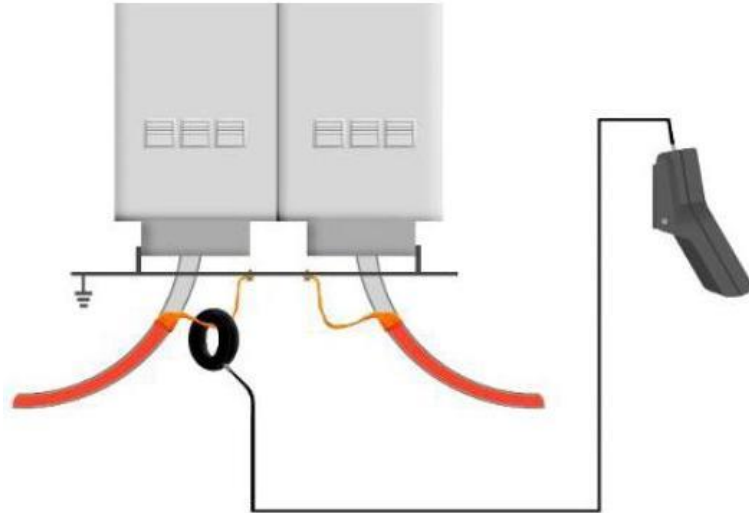


18. ábra: A HVPD 100/50-es áramváltó jellemző frekvenciaválasza [14]

| Felfutási idő | Lefutási idő | Alacsony frekvenciás -3dB-es pont | Nagyfrekvenciás -3dB-es pont | Transzfer impedancia |
|------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------------|
| $17,4\text{ ns}$ | $2,51\text{ ns}$ | 90kHz | 21MHz | 4 mV/mA |

6. táblázat: Injektált impulzusra adott válasz

Ezeket az eszközök csak földelt berendezések külső felszínére, vagy kábelek föld/nulla csatlakozására lehet elhelyezni, semmilyen körülmények között nem csatlakoztathatók a nagyfeszültségű kivezetésekre.



7. táblázat: HFCT helyes elhelyezése [15]

4.1.2 Oszilloszkóp

A mérési adatgyűjtésre egy Agilent U2702A típusú, 200MHz sávszélességű, 20ppm órajelstabilitású oszcilloszkóp modult használtam fel. Ez az eszköz egy USB csatlakozón keresztül a számítógéphez kapcsolható.



19. ábra: Agilent U2702A moduláris oszcilloszkóp [12]

Kis méretének köszönhetően könnyen hordozható, helyszíni mérésekhez is. Nagy, akár 32 megapontos jelgyűjtő memóriája nagy időablakban teszi lehetővé az adatok gyűjtését. Mindkét csatornája 500MSa/s mintavételi sebességgel rendelkezik, melyet 1GSa/s -á lehet összefésülni a két csatornán.

Az oszcilloszkóp különböző elemző funkciókat kínál (összeadás, kivonás, szorzás, osztás), valamint lehetőség van FFT elvégzésére is. Az FFT előtt a jelalakot öt különböző ablak használatával lehet leszűkíteni. Ezek az ablakok: Hanning, Hamming, Blackman-Harris, téglalap és háromszög.

4.2 Mérési adatgyűjtés

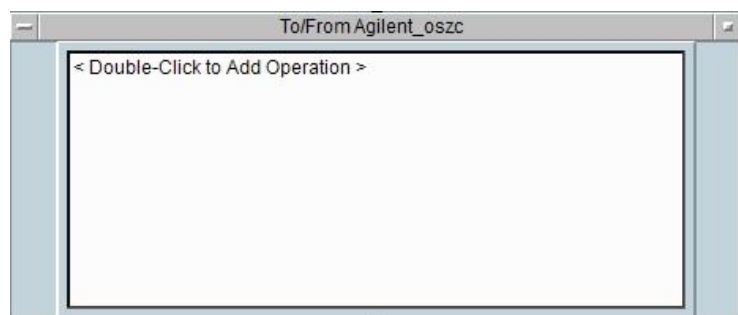
Dolgozatom készítése során egy ilyen online mérés kezdeti lépéseinek megvalósítását tűztem ki célul. A legfőbb feladat az volt, hogy az oszcilloszkóp *32Mpts* memóriájának tartalmából valóságos mért értékeket generáljak, amit statisztikai számításokra is lehet alkalmazni.

Ehhez a folyamathoz az interneten is elérhető *Agilent VEE Pro9.3* programot használtam. Ez a program beépített függvényeivel, funkcióival és lehetőségeivel nagymértékben megkönnyíti a gyártó eszközeivel végzett mérései és kiértékelési feladatokat. A kapott eredmények helyességének ellenőrzésére a MATLAB-ot is felhasználtam.

4.2.1 VEE program

Ezzel az alkalmazással a LABVIEW-hoz hasonló módon, grafikusán lehet programokat készíteni.

Első lépésben a menüsor *I/O* elemének *Instrument Manager...* menüpontjában létre kell hozni egy új eszközt, ami a moduláris oszcilloszkóphoz kapcsolódik. Ezután létre kell hozni egy *IVI-COM Driver* objektumot, majd elhelyezni a munkalapra. Ebben az ablakban lehet létrehozni a különböző függvényeket, valamint itt jelennek meg a függvények bemeneti és kimeneti paraméterei is, amikhez vonalakkal lehet hozzákötni különböző blokkokat.



20. ábra: Függvények beviteli panelja

A következőkben bemutatom az általam használt függvényeket.

- CreateInstance: Létrehoz egy IVI-COM drivert;
- Initialize: megnyitja az I/O munkamenetet a készülék számára. A függvény paraméterei:
 - Resource name: egy karakterlánc, ami azonosítja a készülék címét, mint például a VISA cím.
 - IdQuery: megadja, hogy szükséges-e a műszer azonosítójának megadása. Ez ahhoz szükséges, hogy készülék nélküli szimulációt is lehessen futtatni.
 - Reset: megadja, hogy szükséges-e a készülék alaphelyzetbe állítása.
- Channels.Item.Coupling: indítójel csatolásának (Coupling) módjának lekérdezése és beállítása. Bemeneti paraméterként meg lehet adni, hogy melyik csatornára vonatkozzon a beállítás.
- Channels.Item.Enabled: ha ennek a bemenetét igaznak állítjuk be, akkor a megadott csatornát be lehet állítani, hogy várákozzon beérkező jelre.
- Measurement.AutoSetup: automatikusan konfigurálja az oszcilloszkópot, a bemeneti jel függvényében. Lehetőség van a beállítások külön elvégzésére is, viszont azért választottam ezt a lehetőséget, mert így bármilyen bemenő jelre automatikusan állítja az oszcilloszkópot, ami egy online mérés során, amikor bármilyen bemenő jel érkezésére fel kell készülni, ez a beállítás előnyös.
- Measurement.Initiate: az oszcilloszkóp kilép a várákózó státuszából és az engedélyezett csatornákon várja a jelalak megjelenését.
- Channels.Item.ReadFullWaveform: ezzel a paranccsal lehet az adatokat közvetlenül az eszközből kinyerni, minden adatmanipuláció nélkül (átlapolás vagy a mért értékek átalakítása nélkül). Ez automatikusan érzékeli a 16M/32M adatmennyiséget minden csatormán.
- Channels.Item.Offset: le lehet kérni, hogy a mérésnél mekkora offset lett beállítva.

- Channels.Item.Range: a bemeneti jeltartományt lehet lekérdezni, vagy beállítani. Voltban kifejezett érték. Ha például egy szinusz jelet szeretnénk megjeleníteni, aminek az amplitúdója +5V és -5V között változik, a tartományt célszerű 10V-ra vagy annál nagyobb értékre beállítani.
- Channels.Item.ProbeAttenuation: meg lehet adni a bemeneti jel és az eltárolt jel arányát.
- Close: Lezárja az I/O munkamenetet a készülék számára. Ez után a parancs után nem lehet az eszközhöz hozzáférni.

The screenshot shows a software interface with a central code editor and a property grid on the right. The code editor contains the following text:

```

TDK_Memóriatartalom_kigyűjtése
agilentU2701AClass = CreateInstance("Agilent.AgilentU2701A.Interop", "Agilent.AgilentU2701A.Interop.AgilentU2701AClass")
agilentU2701AClass.Initialize("USB0::0x0957::0x2918::my50032055::0::INSTR", True, True, "")
agilentU2701AClass.Channels.Item(Name).Coupling = coupling
coupling = agilentU2701AClass.Channels.Item(Name).Coupling
agilentU2701AClass.Channels.Item(Name).Enabled = enabled
agilentU2701AClass.Measurements.AutoSetup()
agilentU2701AClass.Measurements.Initiate()
agilentU2701AClass.Channels.Item(Name).ReadWaveform(MaxTimeMilliseconds, ByRef WaveformArray, ByRef InitialX, ByRef XIncrement)
agilentU2701AClass.Channels.Item(Name).ReadFullWaveform(ByRef Data, ByRef Length)
range = agilentU2701AClass.Channels.Item(Name).Range
offset = agilentU2701AClass.Channels.Item(Name).Offset
probeAttenuation = agilentU2701AClass.Channels.Item(Name).ProbeAttenuation
agilentU2701AClass.Close()
< Double-Click to Add Operation >

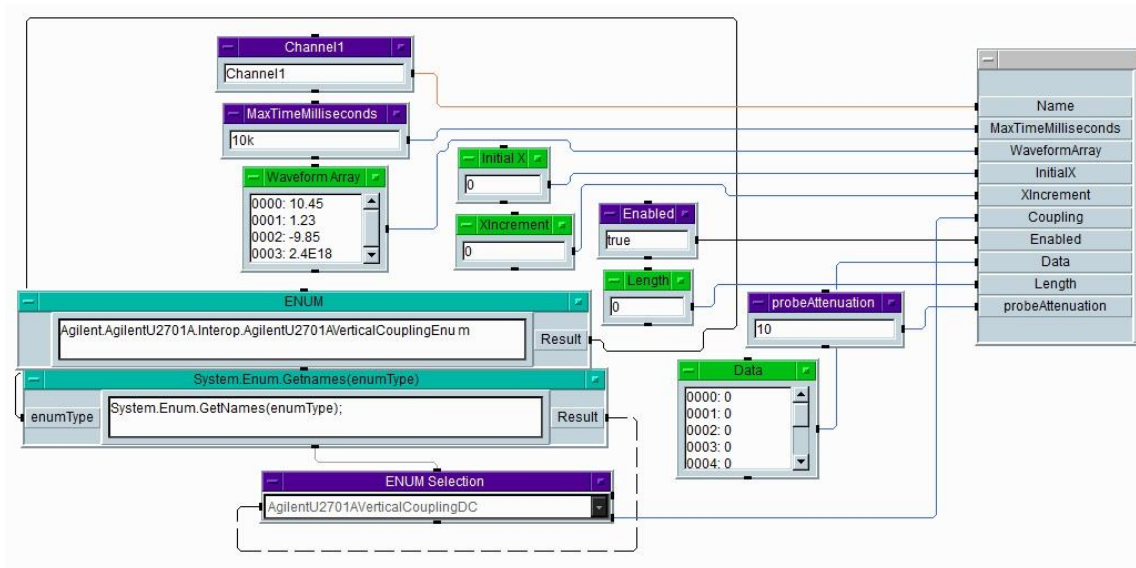
```

The property grid on the right lists the following properties for the `agilentU2701AClass` object:

- agilentU2701AClass
- WaveformArray
- InitialX
- XIncrement
- coupling
- Data
- Length
- range
- offset
- probeAttenuation

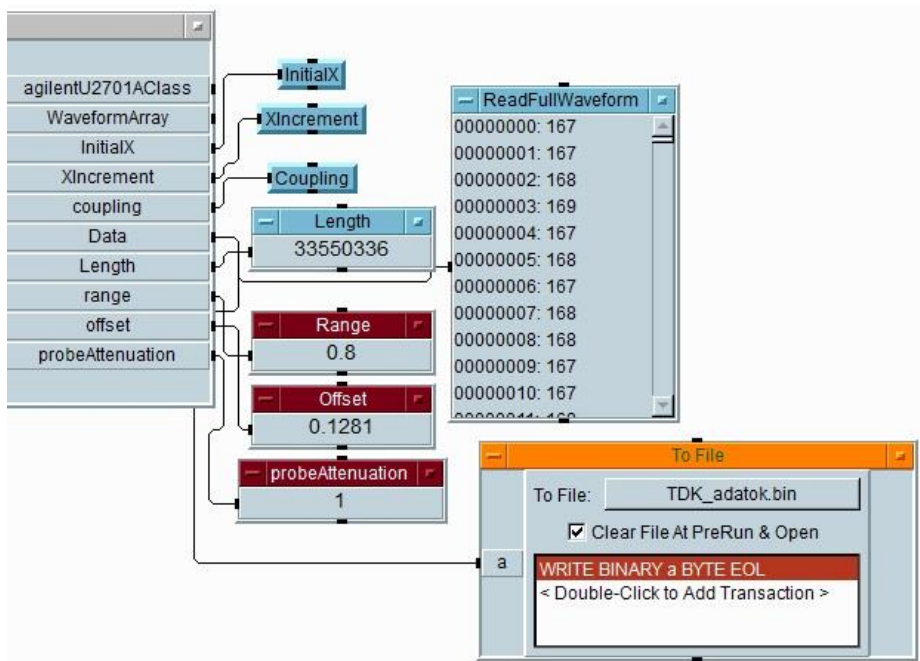
21. ábra: Programkód

A 22. ábra a bemeneti blokkok elrendezését mutatja be. A zölddel jelzett blokkokban a függvények referencia értékeit lehet megadni, a lilával jelzettekben pedig különböző mérés specifikus paramétereket lehet beállítani. Ilyen például a csatorna engedélyezése, csatolás típusa (legördülő menüből lehet választani), vagy ha éppen nem az automatikus konfigurálást választjuk, akkor az ofszet, áttétel, stb..

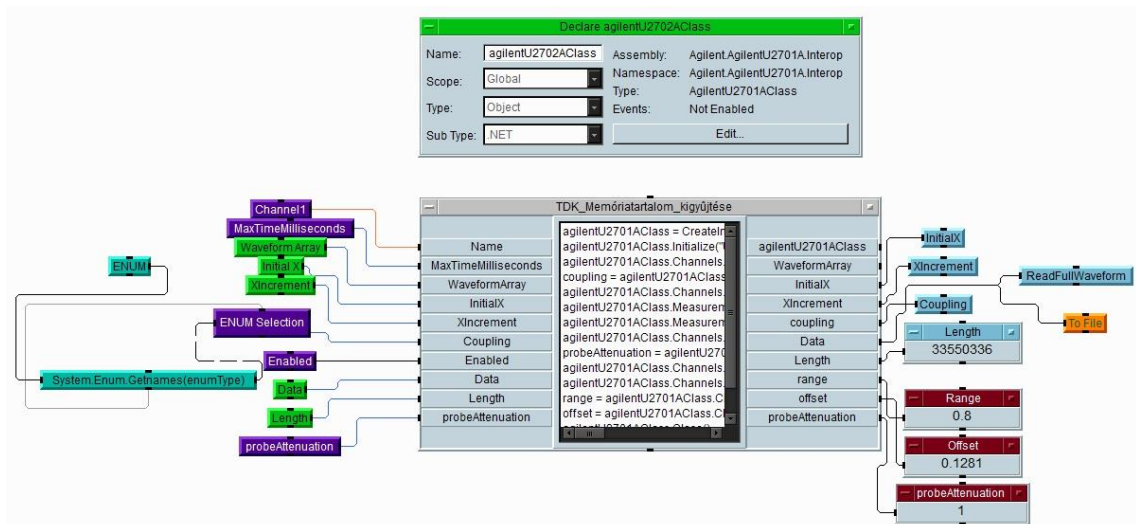


22. ábra: Bemeneti blokkok

A 23. ábra a kimenő blokkokat reprezentálja. A vörössel jelzett mezők számunkra a további feldolgozás érdekében fontosak. A *ReadFullWaveform* ablakban lehet látni a függvény által visszaadott értékeket. Ezek közvetlenül a memóriából származnak, tehát nem mentek keresztül adatmanipuláción. A *Length* mezőben szereplő érték jelzi, hogy a teljes, *32Mp* memória feldolgozásra került. A narancssárga blokkban lehet beállítani, hogy a mérési adatok, egy küldő fájlba mentése során milyen paraméterekkel (kódolás típusa, formátuma) rendelkezzenek.



23. ábra: Kimeneti blokkok



24. ábra: A program teljes felépítése kimeneti és bementi blokkokkal együtt

Ezzel a programmal tehát kaptunk egy bináris fájlt, ami az oszcilloszkóp teljes tartalmát tartalmazza. Ezeknek az adatoknak az átkonvertálását használható értékekké, és azok kirajzolására a MATLAB-ot használtam fel.

4.2.2 Adatok konvertálása

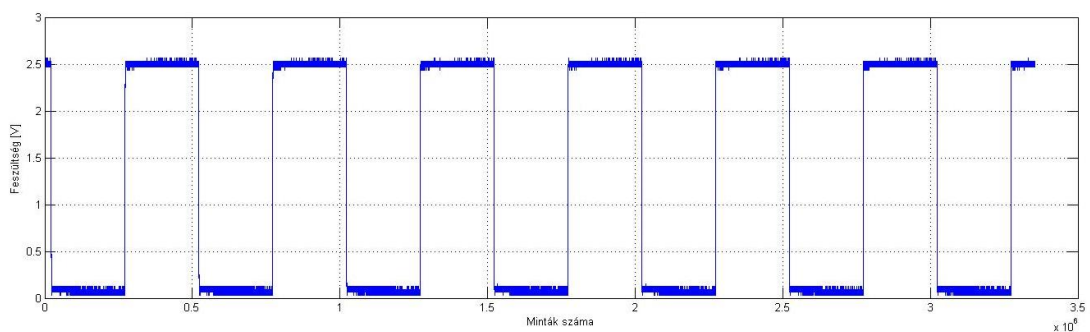
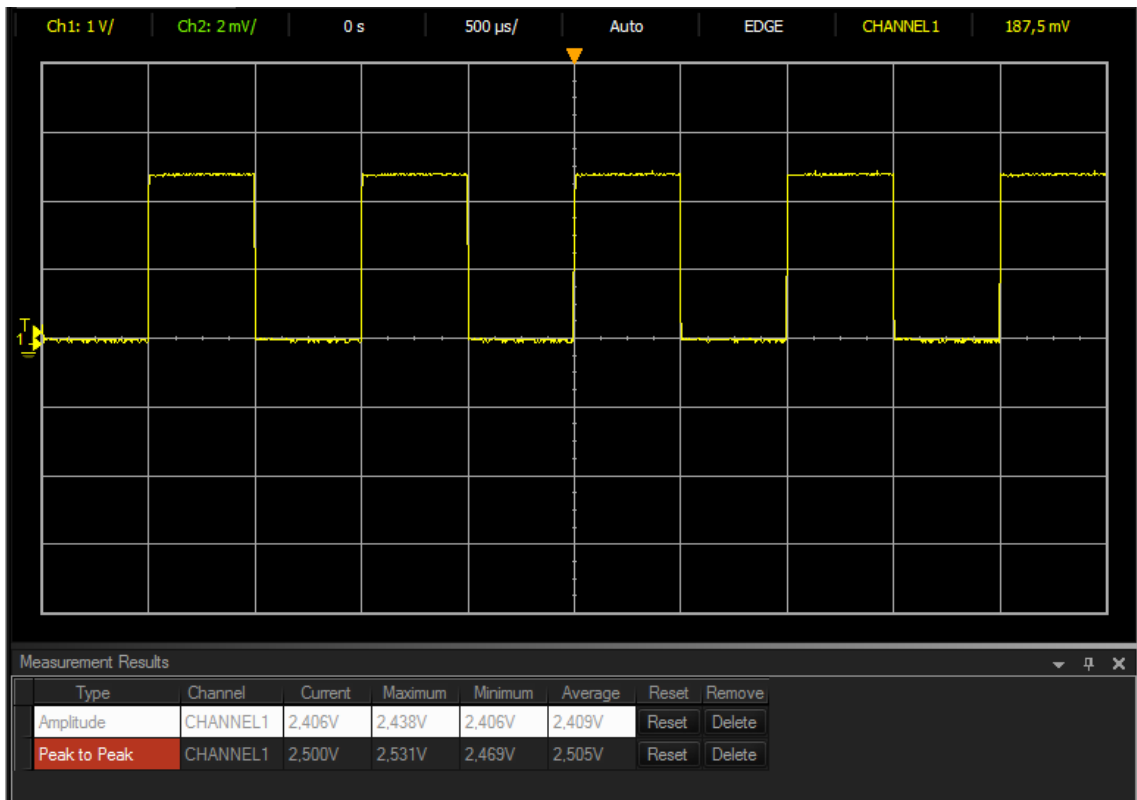
Első lépésként meg kell nyitni a bináris fájlt olvasásra. Ez után be kell állítani, hogy a fájlból mekkora méretű adathalmazt szeretnénk kiszedni. Ha mindent szeretnénk feldolgozni, akkor ezt az értéket a VEE program *Length* nevű kimenetelének értékével egyezőnek kell beállítani. Meg kell adni a kódolást is, ahol figyelni kell, hogy ugyanazt használjuk, mint a fájlba íráskor. Ezt a fájl bezárása követi.

Második lépésben át kell konvertálni az adatokat valóságos feszültségértékekké. Ehhez szükségesek a *Range*, *Offset* és a *probeAttenuation* értékek. Az adathalmaz átalakításához a következő képletet alkalmaztam:

$$adat = \left[data * \frac{range}{256} - \frac{range}{2} + offset \right] * probeAttenuation \quad (5)$$

A képletben szereplő *adat* vektor a transzformáció utáni, a *data* vektor a transzformáció előtti értékeket tartalmazza. [13]

Az oszcilloszkóphoz le lehet tölteni egy szoftvert, ami egy olyan kezelőfelületet tartalmaz, mint ami egy átlagos, nem moduláris oszcilloszkópnál található. Az egyes csatornára rákötöttem a kalibráló jelet, ami az oszcilloszkóp elejére van kivezetve. A programot arra használtam, hogy összehasonlítsam a MATLAB-ban kapott és a tényleges jelalakot.



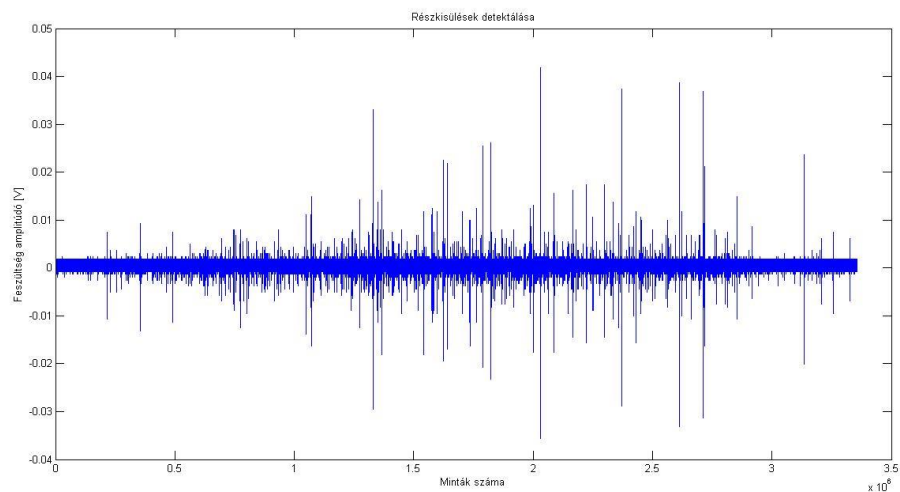
25. ábra: A tényleges (felső) és a számított (alsó) jelalak

Látható, hogy a két hullámforma amplitúdója megegyezik, tehát a számítási mechanizmus helyes. Így kaptunk egy ~32 millió elemes vektort, amiben a mért

eredmények találhatóak. Ennek az adathalmaznak a segítségével már detektálhatók a kábelek szigetelésében keletkező részleges kisülések.

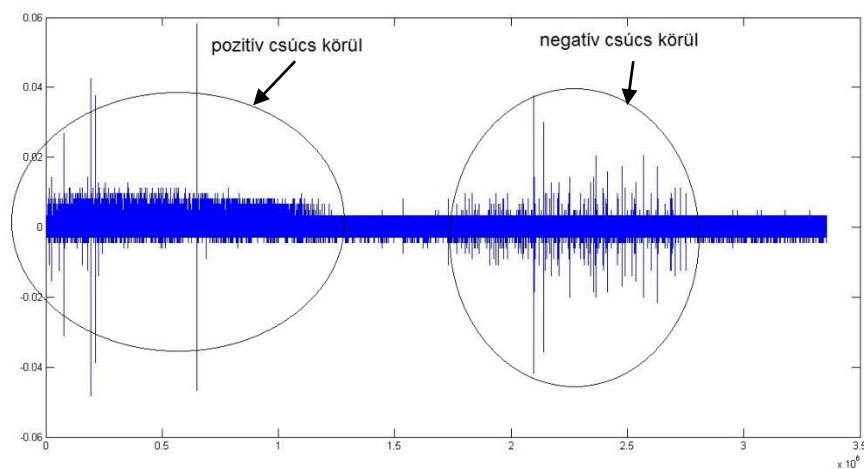
4.3 Próbamérések

Az elkészített rendszer tesztelését a BME Nagyfeszültségű Laboratóriumában végeztük el. A 26. ábrán jól kivehetők a részkisülések által okozott áramimpulzusok. A kijelzett értékek feszültségek, amiket egyszerű számítással át lehet váltani áram értékekké (50Ω -os lezárás az 1-es csatorna bemenetén, és $3,8\Omega$ transzferimpedanciájú áramváltó).



26. ábra: Részkisülés detektálása

A 27. ábra koronakisülések által indukált áramok jelenlétét mutatják:



27. ábra: Koronakisülések detektálása

5 Összegzés, továbbfejlesztési lehetőségek

A villamosenergia szolgáltatóknak egyre növekvő szükségük van a költségeik csökkentésére. Ezt elérhetik olyan úton is, hogy a már meglévő berendezéseiket, kábelhálózatukat a várható élettartamuk közelében üzemeltetik. Azoknak a döntéseknek a meghozatalában, amelyek ezeknek a hálózati elemeknek a karbantartását vagy éppen cseréjét érintik, fontos ismerni az eszközök aktuális állapotát.

Nagyfeszültségű kábelhálózatokon végzett részkiülési mérések jól tükrözik a hálózat elemeinek aktuális állapotát. Dolgozatom készítése során egy ilyen roncsolásmentes diagnosztikai módszerrel ismerkedtem meg közelebbről, amely módszer alkalmazásával a keletkező részkiüléseket a kábelek kikapcsolása nélkül, üzem közben lehet vizsgálni. Az online mérés folyamatos adatszolgáltatást biztosít. Munkám során egy ilyen mérés első lépéseit valósítottam meg.

Sikerült egy oszcilloszkóp és egy nagyfrekvenciás áramváltó használatával részkiüléseket detektálni, és a mért adatokat egy bináris fájlban eltárolni. A nagy mennyiségű adatnak köszönhetően, amit az oszcilloszkóp képes tárolni, a folyamatról részletes képet lehet kapni, ami segít meghatározni egy kábel aktuális állapotát, várható élettartamát.

Munkámat számos lépéssel lehet bővíteni. Egyik ilyen irányzat, hogy a kapott adatokat, továbbítsuk egy távoli számítógép felé is, azáltal szükségtelemé lehet tenni a helyszíni kivonulást. Továbbá készíteni lehet hozzá egy grafikus kezelői interfészt, ahol a mérés paramétereit lehetne változtatni, illetve valós időben lehetne megjeleníteni a mért adatokat.

Dolgozatom készítése során lehetőségem volt jobban megismerni a részkiülések vizsgálatának jelentőségét, valamint egy olyan területre nyertem betekintést, amelynek megismerése és használata a villamosenergia ipari szereplők körében egyre fontosabb, naprakész feladat.

Ábrajegyzék

| | |
|--|----|
| 1. ábra: Szigetelőanyagok helyettesítő kapcsolása..... | 6 |
| 2. ábra: Villamos vizsgálati módszerek alapja..... | 7 |
| 3. ábra: Semleges (a) és polarizálódott (b) szigetelőanyag [2]..... | 9 |
| 4. ábra: A polarizációs spektrum [2] | 10 |
| 5. ábra: A szivárgási áram összetétele..... | 11 |
| 6. ábra: Schering-híd és a Glynne-híd | 12 |
| 7. ábra: Veszteségi tényező a feszültség függvényében | 12 |
| 8. ábra: Teljes feszültségválasz feszültségviszonyai..... | 13 |
| 9. ábra: Vizsgálati módszerek a dielektromos folyamatok jellemzésére [3] | 14 |
| 10. ábra: Szilárd szigetelőanyagok villamos szilárdságának változása az igénybevétel időtartamának függvényében [2]..... | 15 |
| 11. ábra: Részkisülések alaptípusai: koronakisülés, üregkisülés, felületi kisülés, treeing | 17 |
| 12. ábra: Üregkisülés helyettesítő képe | 18 |
| 13. ábra: Hagyományos részkisülés vizsgáló áramkörök: soros (a) és párhuzamos (b) | 19 |
| 14. ábra: Az oszcilláló hullámú vizsgálat áramköri felépítése | 21 |
| 15. ábra: Akusztikus vizsgálat mérési elrendezése | 22 |
| 16. ábra: A helyszíni és a központi adatfeldolgozás | 23 |
| 17. ábra: HVPD 100/50-es áramváltó..... | 25 |
| 18. ábra: A HVPD 100/50-es áramváltó jellemző frekvenciaválasza | 25 |
| 19. ábra: Agilent U2702A moduláris oszcilloszkóp | 26 |
| 20. ábra: Függvények beviteli panelja..... | 27 |
| 21. ábra: Programkód | 29 |
| 22. ábra: Bemeneti blokkok | 30 |
| 23. ábra: Kimeneti blokkok..... | 30 |
| 24. ábra: A program teljes felépítése kimeneti és bementi blokkokkal együtt | 31 |
| 25. ábra: A tényleges (felső) és a számított (alsó) jelalak | 32 |

| | |
|---|----|
| 26. ábra: Részkisülés detektálása | 33 |
| 27. ábra: Koronakisülések detektálása | 33 |

Irodalomjegyzék

- [1] John Densley: *Ageing Mechanism and Diagnostics for Power Cables*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 17, No. 1, 2001.
- [2] Villamos szigeteléstechika:
www.muszeroldal.hu/measurenotes/villamosszigetelestechika.pdf
(2013.október 11. 18:15)
- [3] Tamus Zoltán Ádám: *Villamos szigetelések vizsgálata*, VER villamos készülékei és berendezései tananyag, www.vet.bme.hu
- [4] Tamus Zoltán Ádám, Cselkó Richárd, Németh Bálint, Berta István: *Termikus és feszültség alatti öregítés hatása a diagnosztikai paraméterekre*
- [5] *A részleges kisülések méréséről általában*
http://www.insulationdiagnostics.com/index.php?page=item&item_id=90&lang=HU
- [6] Steven Boggs, John Densley: *Fundamentals of Partial Discharge in the Context of Field Cable Testing*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 16, No.5, 2001.
- [7] A. Cavallini, G. C. Montanari, F. Puletti: A Novel Method to Locate PD in Polymeric Cable System Based on Amplitude-frequency (AF) Map, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 3, 2007.
- [8] BME Villamos Energetika Tanszék: Szigetelések roncsolásmentes vizsgálata
- [9] HVPD HFCT 100/50 adatlap:
<http://www.hvpd.co.uk/media/pdf/brochures/HVPD-HFCT-100-50-Portable-Product-Card.pdf> (2013.október 15. 20:32)
- [10] <http://www.hvpd.co.uk/products/sensors/hfct-100-50-portable.html>
(2013.október 19. 14:15)
- [11] Csépes Gusztáv: *Villamos főberendezések üzembiztonságának egyszerű és gazdaságos növelése a szigetelések állapotellenőrzésével, a diagnosztika sajátosságai és legújabb eredményei*, előadásvázlat, Balatonfüred, 2001. április 26-27.

- [12] Agilent U2702A USB Modular Oscilloscope Data Sheet:
www.home.agilent.com/agilent/redirector.jsp?action=ref&cname=AGILENT_EDITORIAL&ckey=2150237&lc=eng&cc=HU&nfr=-34492.774929.00
(2013.október 19.14:23)
- [13] The Memory Depth of a USB Modular Oscilloscope, Application Note
- [14] <http://www.hvpd.co.uk/products/sensors/hfct-100-50-portable.html>
- [15] <http://www.hvpd.ru/pdsurveyor.htm>