



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

Németh Regina Mária

**Szigetelések kiterjesztett Debye
modell paramétereinek
meghatározása feszültségválasz
méréssel**

TDK dolgozat

KONZULENSEK

Tamus Zoltán Ádám

Urbán András

BUDAPEST, 2017

Hallgatói nyilatkozat

Alulírott **Németh Regina Mária**, energetikai mérnök hallgató kijelentem, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Kelt: Budapest, 2017. október 27.

.....

NÉV

Tartalomjegyzék

Hallgatói nyilatkozat	i
Táblázatok jegyzéke	iii
Ábrajegyzék	iv
Összefoglaló	v
Abstract	vi
1. Bevezetés, a téma aktualitása	1
2. Villamos erőtér hatása a szigetelőanyagra	3
2.1. A vezetés folyamata	3
2.2. A polarizáció folyamata	3
3. A szigetelőanyagban fellépő meghatározó romlási folyamatok	5
4. Szigetelések villamos modellje	7
5. A teljes feszültségválasz mérésének módszere	9
5.1. A feszültségválasz mérésének alapjai	9
5.2 A teljes feszültségválasz (VR) mérés	12
5.2.1. A teljes feszültségválasz mérés megvalósítása	14
6. A Debye-modell paramétereinek meghatározása	16
6.1. A program alapjául szolgáló egyenletek és bemeneti paraméterek	16
6.2. A GlobalSearch megoldó működése optimumkeresésre	18
6.3. Az algoritmus validálása	20
7. Transzformátor szigetelés vizsgálata az algoritmus használatával	31
8. A felhasználói felület	35
9. Összegzés	36
10. Függelék	37
10.1. Az alkalmazott MatLAB programkód	37
10.2. Hibaszámítás bemutatása	39
10.3. Transzformátormérés időállandói	40
Irodalomjegyzék	41

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat: A teljes feszültségválasz mérés menete, értelmezése az elvi kapcsolásban.....	12
2. táblázat: Optimumkeresés 2 Debye-tagra és két mérési pontra bemutatva.	17
3. táblázat: Paraméterek értékei a megépített modellben.	20
4. táblázat: 1. modell validálása a teoretikus számolt és optimalizált értékekkel.....	21
5. táblázat: 2. modell validálása a teoretikus számolt és optimalizált értékekkel.....	21
6. táblázat: 3. modell validálása a teoretikus számolt és optimalizált értékekkel.....	22
7. táblázat: Mért és az algoritmus által számolt R-C tagok összehasonlítása a validálás első szempontjából.....	22
8. táblázat: A VR mérés hibái (eltérés négyzetösszegei) a számolt értékekhez képest.	23
9. táblázat: 1. modell optimalizált értékei 10 Debye tagra és az ebből számolt meredekségek.	24
10. táblázat: 1. modell: kiértékelés 1 Debye tagra.	25
11. táblázat: 2. modell optimalizált értékei 10 Debye tagra és az ebből számolt meredekségek.	26
12. táblázat: 2. modell: kiértékelés 2 Debye tagra.	27
13. táblázat: 3. modell optimalizált értékei 10 Debye tagra és az ebből számolt meredekségek.	28
14. táblázat: 3. modell: kiértékelés 3 Debye tagra.	29
15. táblázat: 25 °C esetén az optimális tagok időállandói.	33
16. táblázat: 40 °C esetén az optimális tagok időállandói.	33
17. táblázat: 55 °C esetén az optimális tagok időállandói.	33
18. táblázat: 70 °C esetén az optimális tagok időállandói.	33
19. táblázat: Hiba számítás az első modell esetén a VR mérésből kapott és az optimalizált eredményekkel kapott meredekség esetén.	39
20. táblázat: Hiba számítás a második modell esetén a VR mérésből kapott és az optimalizált eredményekkel kapott meredekség esetén.	39
21. táblázat: Hiba számítás a második modell esetén a VR mérésből kapott és az optimalizált eredményekkel kapott meredekség esetén.	39
21. táblázat: Hiba számítás a második modell esetén a VR mérésből kapott és az optimalizált eredményekkel kapott meredekség esetén.	39

Ábrajegyzék

1. ábra: Villamos jelenségek szigetelőanyagokban.	1
2. ábra: Szigetelőanyag polarizálódása villamos erőterben [3].	3
3. ábra: Szigetelőanyagok polarizálhatósága az időállandó függvényében [5].	4
4. ábra: A szigetelőanyagban fellépő dielektromos folyamatok helyettesítő kapcsolása.	7
5. ábra: A feszültségválasz módszerének elvi kapcsolása.....	9
6. ábra: A kisülési a) görbe. b) feszültség a szigetelés helyettesítő kapcsolásán szemléltetve.	10
7. ábra: A visszatérő feszültség a) görbéje. b) a szigetelés helyettesítő kapcsolásán szemléltetve.	10
8. ábra: A teljes feszültségválasz módszer lépései.	13
9. ábra: A BME Villamos Energetika Tanszéken lévő mérőműszer blokkdiagramja.	14
10. ábra: A VR mérés több kisülési időt alkalmazva.	15
11. ábra: GlobalSearch keresőmotor működése.	19
12. ábra: 1. modell: az egyes tagok visszatérő feszültséggörbe meredekséghez való hozzájárulása az időállandó függvényében.....	24
13. ábra: 1. modell program által 10 R-C tagra optimalizált értékei alapján a helyettesítő kapcsolat.	25
14. ábra: A VR mérés 2 R-C tagos modell esetén.....	26
15. ábra: 2. modell: az egyes tagok visszatérő feszültséggörbe meredekséghez való hozzájárulása az időállandó függvényében.....	27
16. ábra: 3. modell: az egyes tagok visszatérő feszültséggörbe meredekséghez való hozzájárulása az időállandó függvényében.....	28
17. ábra: a.) 4 Debye elemes modell b.) 3 Debye elemes modell esetén az egyes tagok visszatérő feszültséggörbe meredekséghez való hozzájárulása az időállandó függvényében.	29
18. ábra: 25 °C-on mért eredmények a.) 12 R-C tagra b.) 6 R-C tagra c.) optimális 4 R-C tagra lefuttatva.....	31
19. ábra: 40 °C-on mért eredmények a.) 12 R-C tagra b.) 6 R-C tagra c.) optimális 4 R-C tagra lefuttatva.....	32
20. ábra: 55 °C-on mért eredmények a.) 12 R-C tagra b.) 6 R-C tagra c.) optimális 5 R-C tagra lefuttatva.....	32
21. ábra: 70 °C-on mért eredmények a.) 12 R-C tagra b.) optimális 5 R-C tagra lefuttatva.	33
22. ábra: A felhasználói felület.....	35
23. ábra: Transzformátor VR mérése alapján a különböző hőmérsékletekhez meghatározott optimális R-C tagokhoz tartozó időállandók eltolódása.	40

Összefoglaló

A lakossági és az ipari fogyasztók villamos energia igényeinek kielégítésére folyamatos energiaszolgáltatás szükséges, mely kiszolgálása a nagyértékű berendezésekből álló villamosenergia hálózaton keresztül történik. A hálózatokon bekövetkezett üzemzavarok jelentős anyagi károkkal járhatnak, ezért fontos feladat a hálózat elemeinek folyamatos diagnosztikája. A berendezések üzembiztonság szempontjából egyik legkritikusabb eleme a szigetelés. A szigetelések vizsgálatának egyik módszere a dielektromos paraméterek mérése. TDK dolgozatom célja, a villamos szigetelések diagnosztizálására használt feszültségválasz mérés eredményei alapján a szigetelés helyettesítő modelljének meghatározása, melynek kivitelezését MatLAB szoftverkörnyezetben végeztem. A helyettesítő kapcsolat a szigetelőanyagban fellépő dielektromos folyamatokat, a vezetést és a polarizációt szemlélteti. A dielektromos folyamatok megváltozásával a szigetelések két legfontosabb romlási folyamata az öregedés és a nedvesedés is jól jellemezhető.

A mérési adatok az adott kisütési időkhöz tartozó visszatérő feszültségválaszokat és a transzformátor geometriai kapacitását tartalmazzák, így ezek képezik az algoritmus bemeneti paramétereit. A MatLAB programkód a visszatérő feszültségválasz meghatározási módja alapján optimumot keres az R-C tagok számára és nagyságára vonatkozóan, amelyek a különböző időállandójú polarizációs folyamatokat reprezentálják. A célfüggvény a mért és számított feszültségválasz értékek különbségének legkisebb négyzetösszege volt. Az optimalizálás további céljai közé tartozik, hogy a szigetelés modelljét az adott esetekben a lehető legkisebb számú R-C taggal helyettesítsük, azaz megállapítsuk, hogy hányadik R-C tag nem járul már jelentősen hozzá a mért visszatérő feszültségválasz értékéhez.

A program validációja különböző számú R-C taggal rendelkező próbaáramkörök segítségével történt, ahol az ellenállások és kapacitások értéke adott. Méréses és számításos úton is meghatározásra kerültek a próbaáramkörök visszatérő feszültségválaszai adott kisütési időknél, és ezek az eredmények kerültek felhasználásra a program kezdeti feltételeiként, amikhez az ismert R-C párok képezték a peremfeltételeket. A program ezeket az R és C értékeket pár százalékos hibával optimalizálta, így az algoritmus megfelelőnek bizonyult. A programhoz készült grafikus felhatalmazói felület biztosítja az egyszerűbb kezelhetőséget, továbbá a kezelőfelület lehetővé teszi az Excel fájlból történő feszültségválasz mérés adatainak beolvasását, így a szigetelés helyettesítő modellje könnyedén előállítható. Az optimalizálás eredménye egyrészt a felhasználó számára láthatóvá válik a program erre a célra kijelölt felületén, másrészt lehetőség van az optimalizált eredmények kimentésére a további adatfeldolgozás érdekében. A funkciók közé tartozik a diagnosztika szempontjából lényeges kapacitás-időállandó diagram megjelenítése, R-C tagok számának, optimalizált értékeinek megjelenítése, különböző állapotú szigetelő anyagok modelljeinek összehasonlítása.

Összeségében a kifejlesztett program a felhasználóbarát kezelői felület segítségével elősegíti a szigetelések egyszerűbb diagnosztizálását a szakemberek számára, mellyel következtetni tudunk a meghibásodásokra, így az esetleges üzemzavarok számának csökkenése prognosztizálható a jövőre nézve.

Abstract

To meet the electricity needs of consumers, continuous energy production is required. Since today's electricity storage is based on small-scale and non-mature technologies. Serving both public and industrial users is done on high-value electrical transmission grids. Malfunctions on grids can cause significant damage to property, so a continuous system diagnostic is an important task. Basically, the transformer is one of the most important and expensive equipment in the electricity system. Verification of the status of these riggings consists of checking number of parameters, such as oil testing, examination of gases accumulated in the gas space, vibration and insulation testing. Therefore, the main aim of my work was to determine a substitution model for insulation based on the voltage response measurement which was carried out in MatLAB software environment. The equivalent circuit illustrates the dielectric processes in the insulation which are conduction and polarization. With the change of dielectric processes, the two most important deterioration processes of the insulation are aging and wetting.

The measurement data includes the return voltage response of the given discharge time and the geometry capacity of transformer which were the input data of the program. The MatLAB code finds the optimum for the R-C parameters and their values based on the voltage response method which represent polarization processes with different time constants. The target function was the smallest square of the difference between the measured and the calculated value of voltage response. Another aim of the optimization is to model of the insulation with the smallest number of R-C parameters. This determines which R-C terms do not significantly contribute to the measured return voltage response.

The validation of the program was carried out by test circuit with different numbers of R-C terms where values of resistance and capacity were given. The return voltages were also determined by measured and calculated way at given discharge times which provide the initial conditions for the program and the known R-C pairs constituted the boundary conditions. The program optimized these R and C values with a few percent error, so the algorithm proved to be appropriate. The graphical user interface provides easier handling, with many other benefits. The interface able to read the voltage response data from Excel files so the isolation of substitute model can easily be evaluated. The result of the optimization becomes visible to user and it is possible to save the optimized results for further data processing. The functions of program also include a diagnostic-relevant capacity-time constant diagram which is outstanding relevant for diagnostic, the number of R-C members, their optimized values, and the comparison of the models of different insulating materials.

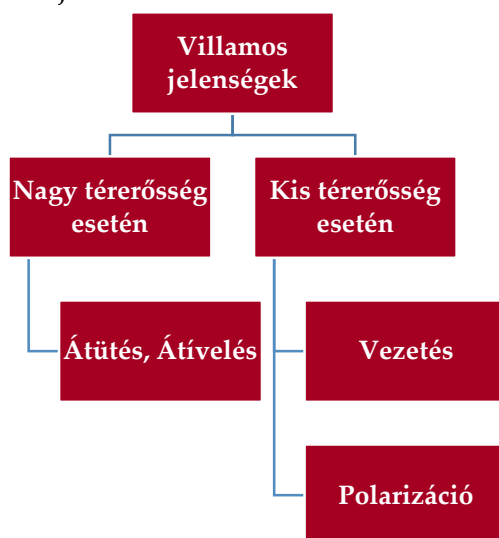
Overall, developing a model with user-friendly interface can greatly facilitate the simpler diagnosis of insulation of transformer for professionals which can be used to predict failure, so decreasing number of malfunctions can be predicted for the future.



1. Bevezetés, a téma aktualitása

A villamosenergia-rendszer bonyolult, drága elemekből felépített rendszer, melyben a berendezések állapota kihat az egész rendszer megbízható működésére, emiatt napjainkban előtérbe került ezen berendezések, készülékek diagnosztikai vizsgálata. A villamos berendezések üzembiztonsága szempontjából az egyik legkritikusabb pontja a szigetelés. A szigetelésdiagnosztika célja a szigetelés állapotának felmérése, az aktuális állapotban történő további üzemelés kockázatainak feltárása, szükséges állapotjavító intézkedések meghatározása [1].

A korszerű szigetelőanyagok igen összetett anyagok, melyek ezáltal komplex diagnosztikát igényelnek. A szigetelőanyagot egyszerre több, párhuzamos igénybevétel éri üzem- és akár tárolás közben is. Ezekre válaszként megindulnak az anyagon belül a különböző típusú romlási folyamatok [2]. Az igénybevételek következtében az anyag molekuláris szerkezete megváltozik, melyek kémiai-, mechanikai- és villamos tulajdonságok változásában nyilvánulnak meg. A molekulászerkezet módosulása befolyásolja a szigetelés villamos szilárdságát – amely a klasszikus értelmezés szerint a szigetelés legfontosabb jellemzője –, valamint az anyagban fellépő dielektromos alapfolyamatokat, a vezetést és a polarizációt [3]. Ezek a folyamatok ma már vizsgálhatók roncsolásmentes módszerekkel, a szigetelés villamos jellemzőinek mérésén keresztül. A mérési eredményekből tehát vissza lehet következtetni a dielektromos folyamatok változására, majd ebből a romlási folyamatok mértékére, végül pedig a villamos szilárdság változására, ami az igénybevételek következtében üzem közben folyamatosan csökkenő tendenciát mutat [3]. A szigetelésben létrejövő villamos jelenségeket az 1. ábra mutatja.



1. ábra: Villamos jelenségek szigetelőanyagokban.



Jelenleg a roncsolásmentes vizsgálatokkal a következő villamos paraméterek vizsgálhatók:

- Veszteségi tényező és permittivitás,
- Szivárgási áram,
- Szigetelés jellemző feszültséggörbéi: kisülési- és visszatérő feszültséggröbe[3].

A tapasztalatok szerint a szigetelések romlási folyamatai elsősorban a vezetés és a polarizációs spektrum nagy időállandójú tartományát befolyásolják [3], [4], így a szigetelés villamos vizsgálatának alkalmazása a diagnosztikában meghatározó. A szigetelés villamos vizsgálataira sokféle dielektromos vizsgálati módszert alkalmaznak, többek közt a szigetelési ellenállás és abszorpció árammérést, a dielektromos veszteségi tényező és kapacitás mérést, illetve a feszültségválaszon alapuló mérést [5][6].



2. Villamos erőtér hatása a szigetelőanyagra

Villamos erőtér hatására a szigetelőanyagban a vezetés és a polarizáció folyamata lép fel, ezeket nevezzük dielektromos alapfolyamatoknak. Mindkét folyamat előidézője az erőtér hatására kialakuló és a szigetelőanyagban eleve meglévő villamos töltéssel rendelkező részecskék elmozdulása, tehát a szigetelőanyagok a valóságban nem tökéletes szigetelők, csekély mennyiségű áram folyik rajtuk keresztül.

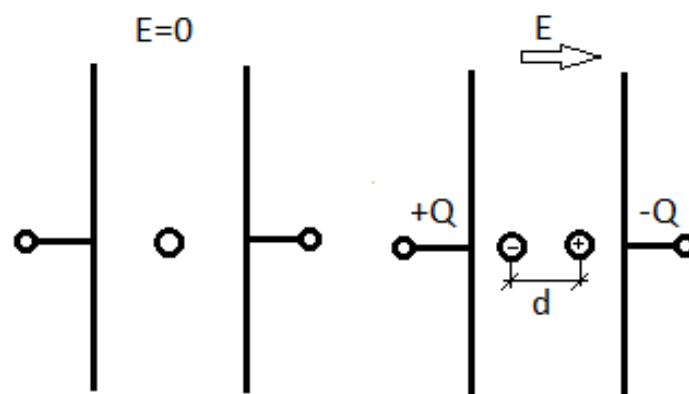
2.1.A vezetés folyamata

A vezetés során a villamos töltéssel rendelkező elemi részecskék az erőtér hatására véglegesen elhagyják helyüket az ellenkező polaritású elektróda felé haladva, melynek elérésekor átadják a töltésüket, azaz valamekkora vezetési áram folyik a szigetelőanyagban. A szigetelőanyagok vezetőképessége erősen függ a hőmérséklettől, növekvő hőmérséklet esetén a vezetőképesség növekszik, a szigetelési ellenállás ennek megfelelően pedig csökken. A vezetési folyamat intenzitását a szigetelőanyag fajlagos vezetőképességével jellemezzük [3, 5].

2.2.A polarizáció folyamata

A polarizáció folyamatát azok a töltéssel rendelkező részecskék idézik elő, melyek a vezetéssel ellentétben nem hagyják végleg el a helyüket, hanem az erőtér hatására eltolódnak az ellenkező polaritású elektróda felé, de az erőtér megszűnésével visszarendeződnek eredeti helyükre. A töltéseket a külső áramkörben keletkező polarizációs áram mozgatja [3, [7].

Erőtér nélkül a pozitív és negatív töltések úgy helyezkednek el a szigetelőanyagban, hogy az kifelé semleges, erőtér hatására pedig dipólussá válik. A polarizáció eredményeképpen polarizációs töltések áramlanak az elektródára, így a polarizációs folyamat az egységnyi elektródafelületen levő kötött töltéssűrűséggel jellemezhető [3]. A szigetelőanyag polarizálódása az erőtérben a 2. ábrán látható.

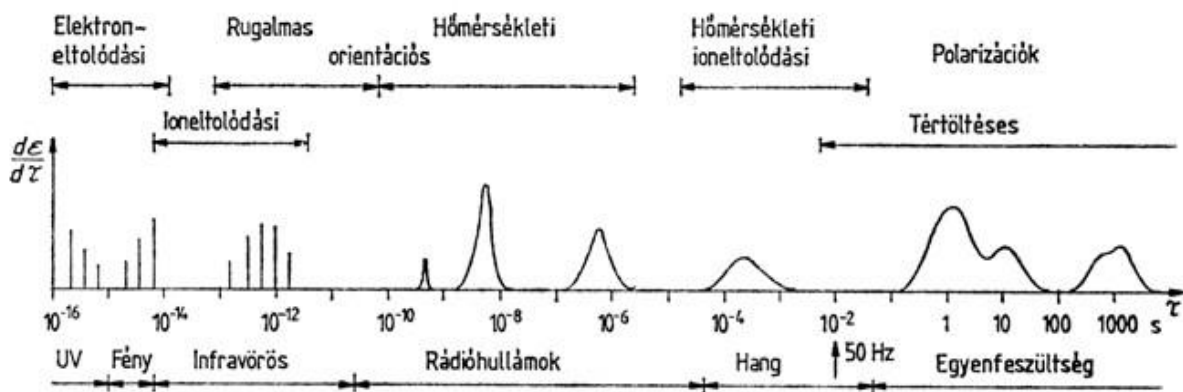


2. ábra: Szigetelőanyag polarizálódása villamos erőtérben [3].



A polarizáció erőssége és a térerősség nagysága között egyenes arányosság áll fenn, állandó térerősség hatására a polarizációs folyamatok időben exponenciálisan fejlődnek ki. A polarizációban lezajló töltésmozduláshoz idő kell, emiatt bevezetésre került a polarizációs folyamat kifejlődési idejének jellemzésére szolgáló időállandó. Mindezenáltal, ugyanez az időállandó vonatkozik a folyamat visszaalakulására is, amennyiben a térerősség csökken. Az időállandók jellemzően $10^{-14} - 10^4$ közötti tartományba esnek [3],[5].

A szigetelőanyagok jelentős részénél több különböző intenzitású és eltérő időállandójú polarizációs folyamat lép fel, melyek a térerősség megjelenésével egyidőben kezdenek kifejlődni. Ha ábrázoljuk az időállandók függvényében a hozzájuk tartozó folyamatok erősségét megkapjuk az anyag polarizációs spektrumát, amely a 3. ábrán látható. Az ábrán levő frekvenciák azt jelölik, hogy a különböző polarizációs folyamatok mekkora frekvenciájú jelekkel vizsgálhatók [3].



3. ábra: Szigetelőanyagok polarizálhatósága az időállandó függvényében [5].

Szigetelésdiagnosztikai szempontból számunkra a spektrum nagy időállandójú tagjai bírnak kiemelt jelentőséggel, hiszen a nagyobb időállandókhöz ($10^2 - 10^4$ s) tartozó folyamatok jellemzik a legfontosabb romlási folyamatait az anyagnak, nevezetesen az öregedést és a nedvesedést [5].



3. A szigetelőanyagban fellépő meghatározó romlási folyamatok

A szigetelést üzem közben érő párhuzamos igénybevételek hatására kémiai, fizikai romlási folyamatok indulnak meg az anyagban, amely a villamos szilárdság folyamatos csökkenését eredményezi [8]. A két lefontosabb folyamat, melyek a szigetelés romlását okozzák a polarizációs spektrumnál már korábban említett öregedés és nedvesedés. Mindkét folyamat mértéke nagyban függ az adott szigetelés anyagi minőségétől, illetve élettartama során ért igénybevételektől és hatásoktól. Így a diagnosztika során ezeket a szempontokat is figyelembe kell vennünk, azaz komplex diagnosztikai vizsgálatok válnak szükségessé. Ebből kifolyólag a helyes diagnosztikai döntés kiemelt szerepet kap a megelőzés és karbantartás szempontjából.

A nedvesedés során a környezetből vízmolekulák hatolnak az anyagba, mivel a vízpára a szigetelőanyag pórusának falán kondenzálódik, melynek következtében az anyag nedvességet képes magába szívni. A diffundált vízmolekulák befolyásolják a szigetelési ellenállást, ezáltal a szigetelés villamos jellemzőit reverzibilis módon. A nedvesedés együtt járhat a vízmolekulák molekulaszervezetbe való beépülésével, vagyis kémiai változással, azonban a nedvesedés elsősorban fizikai folyamat, ami eredményeképp a szigetelés rugalmassága csökkenhet, az anyag rideggé válhat [8]. Ezen romlási folyamat fontos jellemzője még, hogy katalizáló hatásával befolyásolhatja az anyag irreverzibilis öregedését okozó folyamatait, illetve egyéb romlási folyamatait [3].

Öregedésnek nevezzük azokat a szigetelőanyagban fellépő elsősorban kémiai valamint fizikai romlási folyamatokat, melyek az anyag villamos és egyéb fizikai jellemzőinek irreverzibilis romlását okozzák. Üzem közben a szigetelés többféle használatbavétel éri: hő-, környezeti-, mechanikai-, egyéb igénybevétel, melyek együttes hatása a szigetelést öregíti, élettartamát csökkenti. Az élettartamra legnagyobb mértékben a hő- és villamos igénybevétel gyakorol hatást [3]. A szigetelések öregedése lassú folyamat, évtizedekben mérhető, de minden szigetelőanyagban megvan a jellemző kémiai öregedési folyamata, ezáltal másképp öregednek a különböző típusú szigetelőanyagok. Ebből fakadóan elengedhetetlen, hogy a szigetelésdiagnosztika mindig kövesse az új szigetelőanyagok megjelenését és felderítse a különféle szigetelőanyagok öregedésének háttérében álló más-más kémiai reakciókat, meghatározó folyamatokat. Szükség esetén a szigetelés állapotának értékelésére használatos küszöbértékek is módosításra kerülhetnek a helyes diagnosztikai döntés meghozása érdekében. Minden szigetelőanyagban a villamos erőtér hatására fellépő vezetési és polarizációs folyamatok erősségét, jellegét és megváltozását roncsolásmentes diagnosztikai módszerekkel tudjuk vizsgálni,



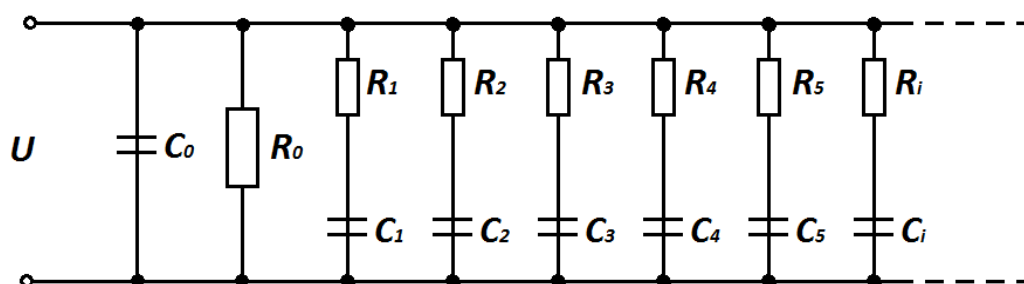
melyekből következtethetünk az anyagban meginduló, illetve a már folyamatban levő romlási folyamatok fejlődésére, erősségére, amely az alapját képezi a diagnosztikai döntés kimenetelének. A megállapítások biztonságát növeli a diagnosztikai vizsgálatok rendszeres elvégzése, így ugyanis a romlási folyamatok előrehaladási sebességéről is képet kapunk [2, 7].



4. Szigetelések villamos modellje

A szigetelés villamos modelljének megalkotása lehetővé teszi a szigetelés elektródjain a villamos erőtér, illetve ennek megváltozása következtében fellépő jelenségek szemléletes bemutatását, aminek meghatározása a mérnöki gyakorlatban a szigetelés diagnosztizálása során igen hasznosnak bizonyulhat. A szigetelés a benne kialakuló dielektromos folyamatok szempontjából a 4. ábrán látható kapcsolással, a kiterjesztett Debye modellel helyettesíthető. A kapcsolat külső áramkörben valamint a szigetelés elektródjain ugyanazokat az áram és feszültségváltozásokat hozza létre, mint a szigetelésben fellépő dielektromos folyamatok [9]. A C_0 geometria kapacitás az az érték, melyet akkor mérhetnénk, ha a szigetelés geometriája nem lenne kitöltve szigetelőanyaggal, vagyis a polarizációs folyamatok hatása nélkül vett kapacitás. A C_0 kondenzátor feltöltődése jelképezi a villamos erőtér felépülését, a benne tárolt töltések pedig az erőtér létrehozó töltések. R_0 a szigetelés szigetelési ellenállását jelöli, amin a vezetés létrejön, az ezen átfolyó áram felel meg a szigetelés időben állandó vezetési áramösszetevőjének[3], [9].

A polarizáció során – ahogy korábban már leírásra került –, kötött töltések áramlanak az elektródákra, így megnő az elektródákon elhelyezkedő töltésmennyiség. Kondenzátor esetében ez azt jelenti, hogy megnő a kondenzátor kapacitása, ezért a kapcsolatban a C_i kapacitások jelképezik az illető folyamat által kötött töltéseket, azaz a polarizációs folyamat erősségével arányosak. A C_i kondenzátorokban levő összes töltés a szigetelés elektródjain levő kötött töltéseknek felel meg [9]. A polarizációs folyamatok okozta kapacitásnövekedést a C/C_0 hányados adja meg, ez a szigetelőanyag relatív permittivitása [3]. A soros R-C tagok, más néven Debye-tagok a különböző időállandójú polarizációs folyamatokat reprezentálják, az R·C szorzat a folyamat időállandóját adja [10],[11]. Mivel a polarizációs spektrum folytonos, ezért végtelen sok R-C tag jellemezi a dielektromos folyamatokat. Ha nem törekszünk a teljes spektrum lefedésére, kiemelhetők centrális időállandók, amelyek intenzívebbek a többinél. Ez számunkra azért fontos, mert egyszerűsíteni tudjuk a modellt kevesebb számú RC tagra [5].



4. ábra: A szigetelőanyagban fellépő dielektromos folyamatok helyettesítő kapcsolása.



A polarizációs folyamatoknál beszélhetünk nagy-, illetve kis időállandójú folyamatokról. A kis időállandójúak jóval egy szekundum alá esnek, ezeket a geometriai kapacitás foglalja magába. A soros RC tagok a nagy időállandójú, vagyis szekundumnál nagyobb időállandójú folyamatokat képviselik [8].

A helyettesítő kapcsolás használható egyen- és váltakozó feszültség esetén is, hiszen mindkét esetben helyesen képezi le a dielektromos folyamatokat, valamint alkalmazható tetszőleges idő- és frekvenciatartományban is [3].

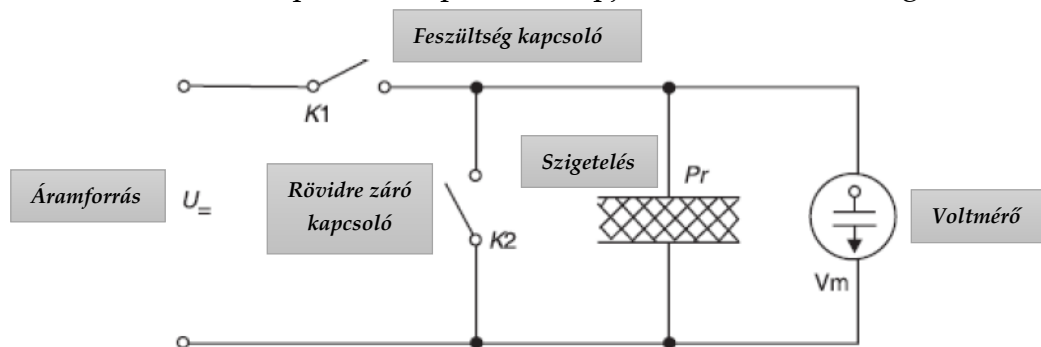


5. A teljes feszültségválasz mérésének módszere

A feszültségválasz mérésen alapuló diagnosztikai módszerek a '60-as években Dr. Németh Endre munkásságának eredményeként kerültek bevezetésre [12]. A feszültségválasz, azaz a szigetelés elektródjai között fellépő feszültségek időbeni változásának meghatározásából két diagnosztikai módszer is kifejlesztésre került: a teljes feszültségválasz (VR) és a visszatérő feszültség mérés (RVM) [13]. Ezen módszerek alkalmasak a vezetési folyamat és a nagyidőállandójú polarizációs folyamatok követésére, így az állapotfigyelés hasznos eszközei lettek.

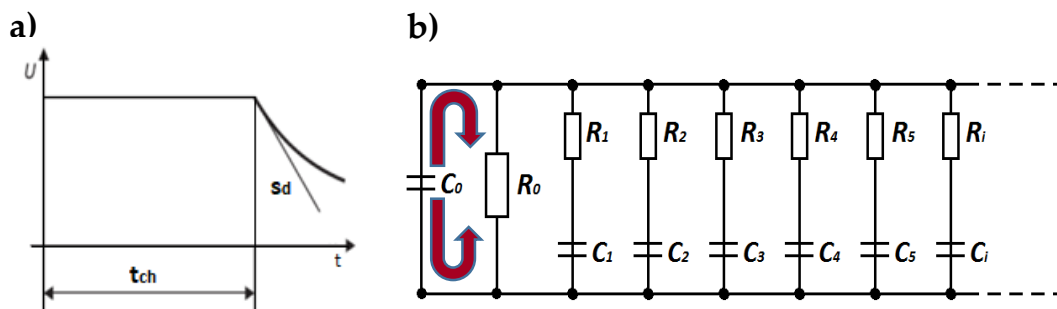
5.1. A feszültségválasz mérésének alapjai

Az elektródákon két feszültséggörbe mérhető, a kisülési- és a visszatérő feszültség görbéje, ezek az 5. ábrán szereplő elvi kapcsolás alapján határozhatók meg.



5. ábra: A feszültségválasz módszerének elvi kapcsolása.

A feszültségmérés úgy történik, hogy a K1 kapcsolóval feszültséget kapcsolunk a szigetelésre, a K2 kapcsoló kisüti a próbatestet, majd a V_m fogyasztásmentes voltmérővel a feszültség mérhető. A szigetelés kisülési feszültséggörbéjét határozhatjuk meg, ha a szigetelésre hosszabb időtartamig (minimum 10 perc) egyenfeszültséget kapcsolunk, azaz feltöltjük, majd ezt követően a szigetelést lekapcsoljuk a feszültségforrásról. Ekkor az elektródok töltése a szigetelés ellenállásán keresztül egyenlítődik ki. Az így létrejövő feszültséget a fogyasztásmentes voltmérővel mérjük [3],[14]. A kisülési görbe lefutását (lassú csökkenését) a 6. a) ábra mutatja. A folyamat szemléltetése a 4. fejezetben tárgyalt helyettesítő kapcsoláson keresztül a 6. b) ábrán látható.

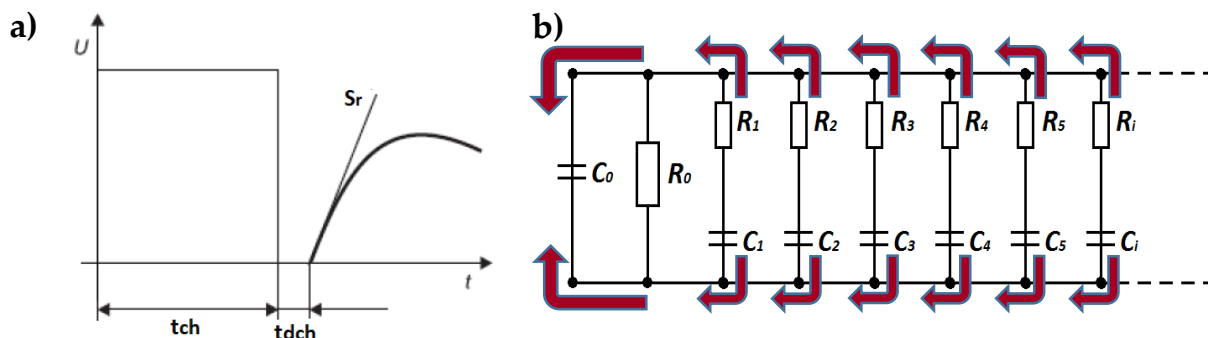


6. ábra: A kisülési a) görbe. b) feszültség a szigetelés helyettesítő kapcsolásán szemléltetve.

A feszültségforrásról való leválasztás után a kapcsolási rajzban (6. b) ábra) a szigetelés geometriai kapacitását helyettesítő kondenzátor, illetve az Debye (soros R-C) tagokban található kapacitások kisülése a szigetelési ellenálláson keresztül történik. A feszültség csökkenésének üteme a szigetelési ellenállás nagyságától függ, minél kisebb ez az érték, a diagramban mutatkozó feszültség csökkenés annál gyorsabb [3],[14].

A feszültséggörbe felvétele azért lényeges, mert a kezdeti érintő meredeksége mindössze a szigetelés fajlagos vezetőképességétől függ, azaz a fajlagos szigetelési ellenállástól. Ennek köszönhetően a kisülési görbe fontos információkkal szolgál számunkra a szigetelőanyagban végbemenő vezetési folyamatról, mely diagnosztikai szempontból kiemelt jelentőséggel bír.

A visszatérő feszültség görbéje ugyancsak a szigetelés hosszabb idejű feltöltését követően mérhető, de ebben az esetben a feltöltés után rövidebb időtartamokig kisütjük. A visszatérő feszültséget a feltöltés alatt a szigetelésben kifejlődött és a rövidzár alatt még vissza nem fejlődött polarizációs folyamatok visszaalakulása hozza létre [3][11]. Ezeknek a folyamatoknak az időállandója a feltöltési és a kisütési (rövidzárási) idő közé esik. Ebből a megállapításból kifolyólag lehetőségünk van csak tetszőleges időállandójú polarizációs időállandó-tartományba eső polarizációs folyamatokat vizsgálni a feltöltési- és rövidzárási idők helyes megválasztásával [5].



7. ábra: A visszatérő feszültség a) görbéje. b) a szigetelés helyettesítő kapcsolásán szemléltetve.



A 7. a) ábrán látható görbe úgy valósul meg, hogy a feltöltés alatt az elektródákon felhalmozott szabad és kötött töltésekből a rövidzárás ideje alatt a szabad töltés kisül, a kötött töltés pedig megmarad a polarizációs folyamatok nagy időállandójának köszönhetően. A rövidzár megszüntetése után a polarizációs folyamatok visszafejlődése folytán a polarizáció által lekötött töltések szabaddá válnak, ezek hozzák létre a visszatérő feszültség kezdeti növekedését. A visszatérő feszültség akkor éri el maximális értékét, amikor bizonyos idő után a növekvő térerősség és a visszafejlődő polarizáció egyensúlyba kerül. A csúcserték elérése után a töltések az előző görbéhez hasonlóan kisülnek a szigetelési ellenálláson keresztül.

A helyettesítő kapcsoláson keresztül a következőképp szemléltethető: a hosszabb feltöltési idő után feltöltődnek a kondenzátorok, azaz mind a geometriai kapacitás, mind a Debye elemek kapacitásai. Ezt követően a rövidzár kisüti a C_0 kondenzátort, a rövidre zárás bontása után a soros R-C tagokban szereplő kondenzátorok feltöltve maradnak, ezek a tárolt töltések átáramlanak a C_0 kondenzátorba, amíg az összes kondenzátor feszültsége ki nem egyenlítődik, majd végül mindegyik kondenzátor töltése kisül a szigetelési ellenálláson keresztül.

A visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredeksége kizárólag a polarizációs folyamatok intenzitásától függ, így ezen görbe ábrázolása is fontos információkat hordoz a szigetelés diagnosztizálása szempontjából.

A feszültséggörbék mérése az előzőekből adódóan alkalmazható az alap dielektromos folyamatok külön-külön történő vizsgálatára, tehát mindkét bemutatott görbe meredeksége csak az egyik folyamat alapjellemezőjével arányos. A visszatérő feszültség másik fontos jellemzője a csúcsertéke, amelynek értékét azonban mindkét dielektromos folyamat befolyásolja. Ezen görbék mérésén a már korábban tárgyalt két módszer alapul: VR (Voltage Response) és RVM (Return Voltage Measurement). Mindkét módszer alkalmazásánál szükség van mind a kisülési- mind a visszatérő feszültség görbéjének együttes mérésére. Az RVM módszer a visszatérő feszültség időállandó függésének mérésén alapul, a polarizáció erősségének időállandó szerinti eloszlását vizsgálja, a VR módszer pedig a vezetési és a nagy időállandós folyamatok intenzitását egy-egy mérőszámmal, a kisülési és a visszatérőfeszültség kezdeti meredekségével jellemzi. A módszer továbbfejlesztése lehetőséget nyújt a szigetelés helyettesítő kapcsolásának meghatározására. A teljes feszültségválasz módszer továbbfejlesztésével az RVM méréshez képest a mérés időtartama jóval rövidebb, ezáltal a berendezések hálózatról való lekapcsolásának ideje lerövidíthető, ugyasakkor a mérés az RVM-hez hasonlóan információt szolgáltat a polarizációs folyamatok időállandó szerinti eloszlásáról [9, 10]. A továbbiakban a teljes



feszültségválasz mérésének menete, az ehhez kapcsolódó jellemzők, illetve a mérés megvalósítása kerül ismertetésre.

5.2 A teljes feszültségválasz (VR) mérés

Ahogy már leírásra került a feszültség mérésen alapuló módszerek alkalmazása során első lépésben a szigetelést hosszú időn keresztül feltöltjük. Megállapítható, hogy az egyenfeszültséggel való feltöltés után a mért kisülési görbe kezdeti érintőjének meredeksége egyenesen arányos a szigetelés fajlagos vezetőképességével, illetve, adott feltöltési- és kisütési idő után a meghatározott visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredeksége arányos a két idő közé eső polarizációs folyamatok intenzitásával. Ez abból következik, hogy ezek a polarizációs folyamatok lesznek gerjesztett állapotban, aminek hatására visszatérő feszültség válik mérhetővé. A mérési folyamat során a két feszültséggörbe egy mérésen belül kerül lemérésre. A mérés menetét és az 5.1.-es fejezetben található 5. ábrán levő elvi kapcsolás kapcsolóinak állását az 1. táblázat mutatja, a 8. ábrán pedig a módszer 4 szakasza látható feszültség-idő diagramban ábrázolva.

1. táblázat: A teljes feszültségválasz mérés menete, értelmezése az elvi kapcsolásban.

Mérés szakaszai	K1 kapcsoló állása	K2 kapcsoló állása
1.) Szigetelés feltöltése	zárt	nyitott
2.) A kisülési görbe S_a kezdeti meredekségének mérése	nyitott	nyitott
3.) Szigetelés kisütése	nyitott	zárt
4.) A visszatérő feszültség S_r meredekségének mérése	zárt	nyitott

A feltöltés során az anyagban fellépő dielektromos folyamatokat egyenfeszültséggel gerjesztjük, melynek nagysága 1 és 3 kV közé esik, mivel ezen a feszültség szinten már kialakulnak a vezetési és polarizációs folyamatok, de az elektródákon még nem léphet fel kisülés. A feltöltési idő hosszát, valamint a szigetelés kisütésénél a rövidre zárás időtartamát az alapján választjuk meg, hogy milyen polarizációs időállandó tartományt szeretnénk megvizsgálni. A szigetelés feltöltésénél az 5. ábrán levő kapcsolási rajzban a K1 kapcsoló zárt, a K2 kapcsoló nyitott állapotban

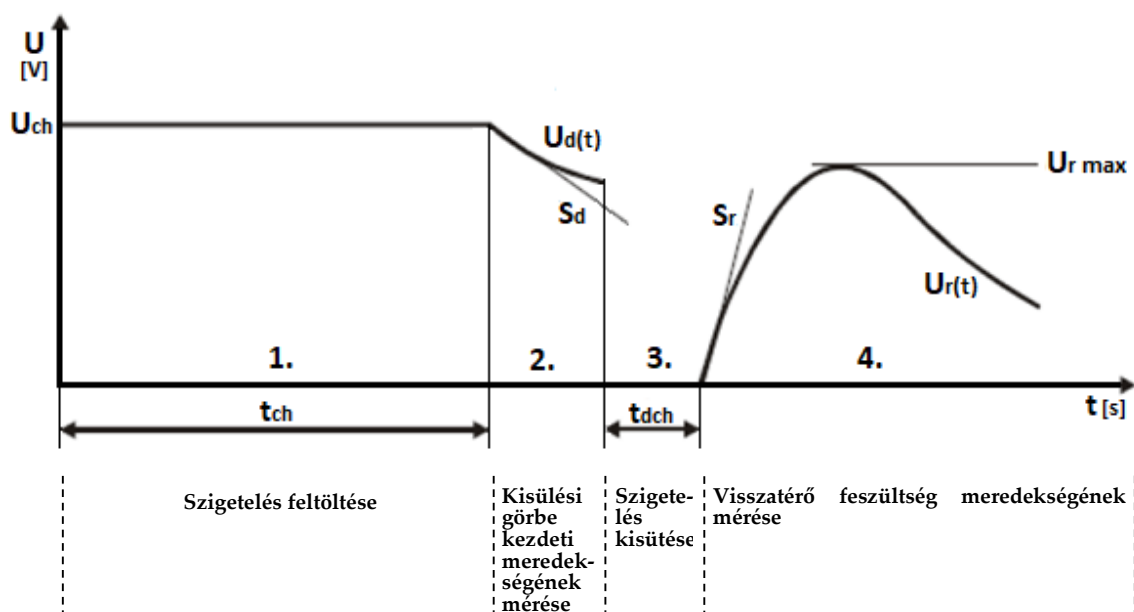


van, a kisütésnél pedig ennek fordítottja valósul meg, a K1 kapcsoló nyitott, a K2 kapcsoló zárt állásban található.

A kisülési görbe kezdeti meredekségének meghatározásához elég a feszültség kismértékű csökkentése, majd ezután a létrejövő görbe meredekségének a program által közvetett módon való meghatározása, így a visszatérő feszültség értékét szinte nem befolyásolja. A mérés ezen szakaszánál az elvi kapcsolásban K1 és K2 kapcsolók nyitott állásban vannak, a szigetelés a feszültségforrásról le van kapcsolva.

A visszatérő feszültséggörbe esetében a kezdeti meredekségének meghatározásához is elegendő a görbe kezdeti szakaszát mérni, ezzel már biztonságosan meg tudjuk határozni a meredekség értékét. A mérés ezen folyamata alatt a K1 kapcsoló zárt, K2 kapcsoló nyitott állapotba kerül, ahogy a szigetelés feltöltésénél is.

A VR módszert széles körben alkalmazzák nagyfeszültségű szigetelések vizsgálatára, hiszen a dielektromos folyamatok egyenkénti vizsgálata hatalmas előnyt jelent más diagnosztikai vizsgálatokkal szemben, illetve ebből a tulajdonságából fakadóan egyes esetekben lehetségessé válik a szigetelés romlási folyamatainak megkülönböztetése, egyenkénti vizsgálata.

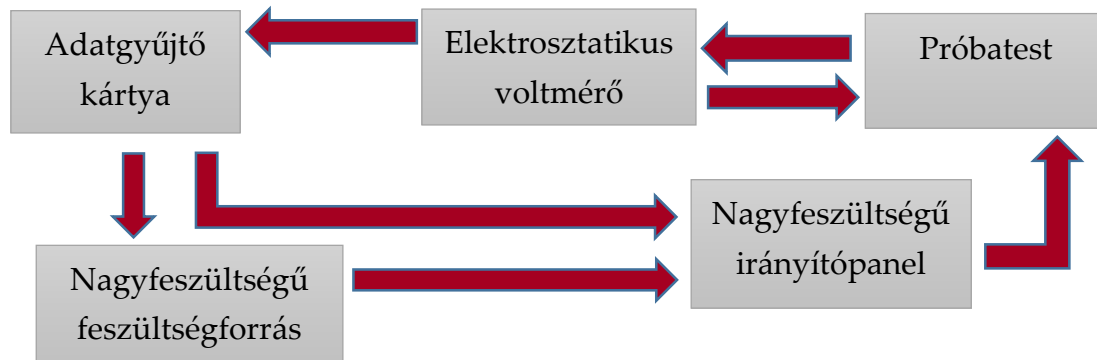


8. ábra: A teljes feszültségválasz módszer lépései.



5.2.1. A teljes feszültségválasz mérés megvalósítása

A mérés megvalósításának első lépéseként a BME Villamos Energetika Tanszéken alkalmazott mérőberendezés blokkdiagramja kerül bemutatásra a 9. ábrán [15].



9. ábra: A BME Villamos Energetika Tanszéken lévő mérőműszer blokkdiagramja.

A National Instruments NI-USB 6009-es típusú mérő és adatgyűjtő kártyával saját szoftverről kerül vezérlésre a nagyfeszültségű feszültségforrás és az irányítópanel. A nagyfeszültségű irányítópanel csatlakozik a próbatesthez, amely a voltmérővel összeköttetésben áll. Az elektrosztatikus voltmérő a mért feszültségértékeket továbbítja az adatgyűjtő kártyának, ezeket az adatokat a kártya segítségével a szoftver feldolgozza és kiszámítja a kisülési és visszatérő feszültséggörbék kezdeti érintőinek meredekségeit[15].

A mérő és adatgyűjtő kártya analóg és digitális csatornákkal is rendelkezik, 14 bites felbontású. A kártya USB kábelen keresztül csatlakozik a berendezéshez, valamint a mérés során egy C# programnyelven írt algoritmussal vezéreljük.

Az elektrosztatikus voltmérő közel ideális kondenzátornak tekinthető, az átvezetés ellenállása $T\Omega$ nagyságrendű, így egyenfeszültségen szinte fogyasztásmentesen mér. A voltmérő a National Instruments kártya egyik digitális bemenetére kapcsolódik.

A nagyfeszültségű feszültségforrás 1000V töltőegyenfeszültséget szolgáltat, ennek megválasztása azon alapul, hogy ezen a feszültség szinten már a szigetelésben a vezetési folyamatok végbe mennek és a polarizációs folyamatok is megfelelő mértékben kifejlődnek. A feszültségforrás rendelkezik digital enable funkcióval, azaz beállthatunk rajta kézi vagy szoftveres vezérlést is, melyek közül az utóbbi megoldás került alkalmazásra a vizsgálatok során. Ennek vezérléséhez szükség van a mérő-adatgyűjtő kártya egyik digitális kimenetére.

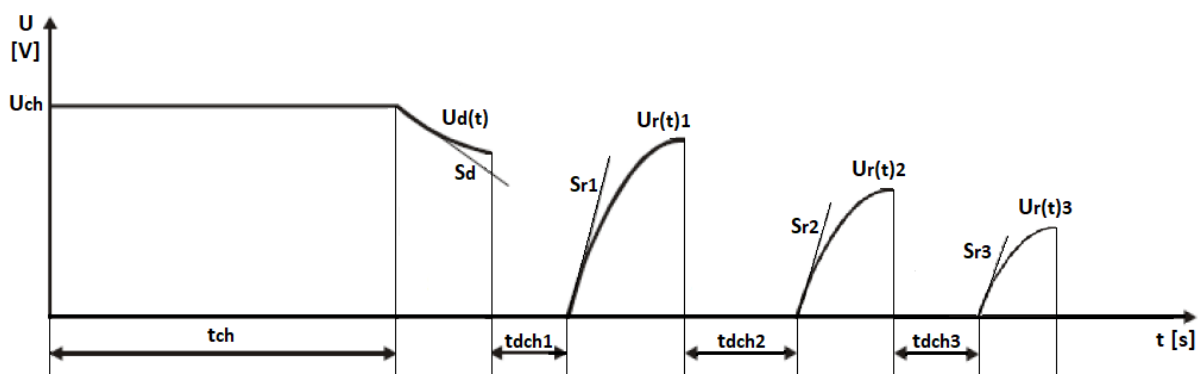
A nagyfeszültségű irányítópanelen találhatóak a kapcsolókhöz (K1, K2) használt reed-relék, melyeket tranzisztorokkal kezelünk, illetve itt található még az ellenállások és LED-ek. A LED-ek szerepe, hogy a kapcsolásról vizuális információt szolgáltatnak. A panel egy dobozba került beépítésre, amelyre két banándugó hüvely



van kihelyezve, az egyik bemenetre a nagyfeszültségű feszültségforrás analóg kimenete csatlakozik, a másik pedig a próbatesthez és a voltmérőhöz csatlakozik[15].

A feszültségválasz-mérő műszer segítségével az 5.2. fejezetben ismertetett VR mérés menete módosításra került. A műszer első lépésben 1000 V feszültséggel 4000 másodpercig tölti a szigetelést, majd méri a kisülési görbe kezdeti meredekségét. Ezt követően különböző időtartamokig (1...2000 s közt) 20 lépésben kisüti a szigetelést, úgy, hogy minden kisütés után megméri a visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredekségét. A mérés eredményeképp megkapjuk a kisülési görbe kezdeti meredekségének nagyságát, és 20 darab visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredekségének értékeit. A dolgozatomban szereplő VR mérésekből származó eredmények ezen, az eredeti teljes feszültségválaszhoz képest módosított mérésel lettek kiértékelve[5]. Fontos megemlíteni, hogy a program validálása során, ami a 6.3. fejezetben kerül részletes bemutatásra, csak az első 16 kisütési idő (idők) került felhasználásra a ténylegesen mért eredményekből, hiszen az ezt követő 4 tag figyelembe vétele jelentős mértékben megnövelte volna a mérési hibát.

A 10. ábrán a továbbfejlesztett VR módszer menete látható, 3 visszatérő feszültséggörbével szemléltetve.



10. ábra: A VR mérés több kisütési időt alkalmazva.

Abban az esetben, ha a 8. ábra összevetésre kerül a 10. ábrával, belátható hogy az eredeti módszer a töltőfeszültség rákapcsolását követően egy rövidre zárás után csak egy visszatérő feszültségből származó meredekséget képes meghatározni, így különböző kisütési idők esetén újra fel kell töltenünk az anyagot, ami előtt hosszabb időre rövidre kell zárunk a mintát, hogy a polarizációs folyamatok teljesen visszaalakuljanak. Ezzel magyarázható, hogy a 10. ábrán megvalósított mérési metódus sokkal időhatékonyabb, mint az eredeti.



6. A Debye-modell paramétereinek meghatározása

A dolgozatom célja a teljes feszültségválasz mérés eredményeiből (adott kisütési idők: t_{dch} , és az ezekhez tartozó visszatérő feszültségválaszgörbe kezdeti meredekségének r_t -ékei: S_r) a 4. ábrán látható helyettesítő kapcsolásban szereplő Debye tagok számának, valamint ezek értékének meghatározása, amelyek a szigetelésben létrejövő dielektromos folyamatokat jellemzik. Ezen paraméterek meghatározására szolgáló program MatLAB szoftverkörnyezetben került kifejlesztésre, mely a szigetelés helyettesítő kapcsolásából felírható egyenleteken és a legkisebb négyzetek módszerén alapszik.

6.1. A program alapjául szolgáló egyenletek és bemeneti paraméterek

A szigetelés helyettesítő modellje alapján megadható egyenként a Debye tagok feszültsége a VR mérés során végrehajtott töltés és rövidzárás után, mely összefüggés az (1)-ben került meghatározásra.

$$U_i = U_{ch} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{ch}}{\tau_i}}\right) \cdot e^{-\frac{t_{dch}}{\tau_i}} \quad (1)$$

ahol az időállandó a (2) alapján kerül meghatározásra.

$$\tau_i = R_i \cdot C_i \quad (2)$$

Az egyes R-C tagokból származó visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredeksége, amelyet a VR mérés folyamán a rövidre zárás bontása után szabaddá vált töltések hoznak létre, a (3)-ben felírt összefüggés szerint számítható.

$$S_{ri} = \frac{U_{ch} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{ch}}{\tau_i}}\right) \cdot e^{-\frac{t_{dch}}{\tau_i}}}{R_i \cdot C_0} \quad (3)$$

Az eredő kezdeti meredekség értéke a kapcsolásban elhelyezkedő Debye tagokból egyenként a (3)-ban meghatározott meredekségek összegeként számítható, melynek matematikai leírása a (4)-ben található.

$$S_r = \sum_{i=1}^n S_{ri} \quad (4)$$

Ez azt jelenti, hogy a teljes feszültségválasz mérés során mért, adott kisütési időhöz tartozó S_r érték a helyettesítő kapcsolásban található egyes R-C tagok által létrehozott S_{ri} értékek összegeként adódik. Tehát minden egyes tag az időállandójának nagyságának függvényében járul hozzá az általunk mért értékekhez.



Az algoritmus bemeneti értékeit a kisütési idők, és az ezekhez tartozó, a mérés alapján meghatározott, visszatérő feszültséggörbe meredekségeinek értékei képezik egy-egy vektorként. A cél az, hogy olyan és annyi R-C párost találjunk, amelyeket behelyettesítve (3)-ba és a megfelelő számú R-C tagra összegezve (4) alapján, minél kisebb eltérést adjon a mért S_r értékekhez képest. A programkódban a célfüggvény a legkisebb négyzetek módszerén alapszik, mivel a számított és a mért visszatérő feszültség meredekség-különbség négyzetösszegének minimalizálása, ezáltal minél pontosabb R és C értékek meghatározása a feladat, melyekkel a helyettesítő modell megfelelően leképezhető.

2. táblázat: Optimumkeresés 2 Debye-tagra és két mérési pontra bemutatva.

Bemeneti értékek (konstansok)	t_{dch1}, t_{dch2} S_{r1}, S_{r2} C_0 t_{ch} U_{ch}	
Első Debye tag ($\tau_1 = R_1 \cdot C_1$) hozzájárulása S_{r1} -hez	$S_{r1Debye1} = \frac{U_{ch} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{ch}}{\tau_1}}\right) \cdot e^{-\frac{t_{dch1}}{\tau_1}}}{R_1 \cdot C_0}$	$S_{r1számolt} = S_{r1Debye1} + S_{r1Debye1}$
Második Debye tag ($\tau_2 = R_2 \cdot C_2$) hozzájárulása S_{r1} -hez	$S_{r1Debye2} = \frac{U_{ch} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{ch}}{\tau_1}}\right) \cdot e^{-\frac{t_{dch2}}{\tau_1}}}{R_1 \cdot C_0}$	
Első Debye tag ($\tau_1 = R_1 \cdot C_1$) hozzájárulása S_{r2} -höz	$S_{r2Debye1} = \frac{U_{ch} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{ch}}{\tau_2}}\right) \cdot e^{-\frac{t_{dch1}}{\tau_2}}}{R_2 \cdot C_0}$	$S_{r2számolt} = S_{r2Debye1} + S_{r2Debye1}$
Második Debye tag ($\tau_2 = R_2 \cdot C_2$) hozzájárulása S_{r2} -höz	$S_{r2Debye2} = \frac{U_{ch} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{ch}}{\tau_2}}\right) \cdot e^{-\frac{t_{dch2}}{\tau_2}}}{R_2 \cdot C_0}$	
Célfüggvény (legkisebb négyzetek módszere)	$hiba = (S_{r1számolt} - S_{r1})^2 + (S_{r2számolt} - S_{r2})^2 \rightarrow f(\min)$	

A (3)-as összefüggést vizsgálva megállapítható, hogy a geometriai kapacitás, a töltési idő és a töltési feszültség a mérés során végig meghatározott értékeket képvisel,



amelyeket az algoritmusba konstans értékeként alkalmazunk, míg a kisütési idő minden egyes mérési pontnál más, de értékeit a vizsgálati mérésekből fakadóan ismerjük. A kitevőkben szereplő τ_i polarizációs időállandók és a nevezőben levő R_i ellenállások ismeretlenek, így az optimalizálást erre a két értékre kerül kivitelezésre egy beágyazott megoldó segítségével. Az optimalizált értékek ismeretében a C_i kapacitás (2) összefüggésbe való behelyettesítéssel egyszerűen számolható. A 2. táblázat lépésenként mutatja be két R-C tagra és két mérési pontra vonatkozóan az előzőekben leírt optimumkeresési feladatot a szemléltetés érdekében.

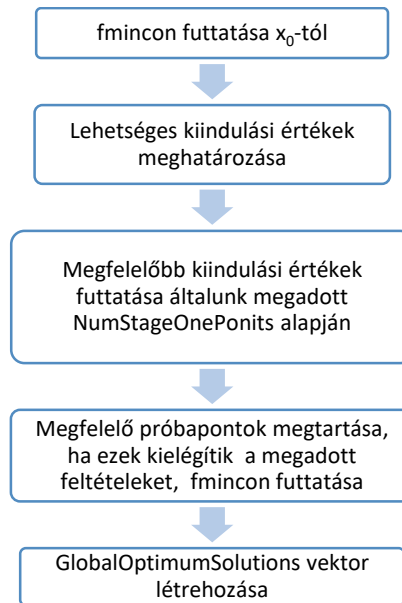
Az itt bemutatott esetben tehát az alkalmazott algoritmussal $R_1 - \tau_1$ és $R_2 - \tau_2$ párosok kerülnek meghatározásra a célfüggvény minimumának értelmében. A gondolatmenet áthelyezhető több mérési pont és több R-C tag esetére is.

A MatLAB szoftverkörnyezet lehetőséget nyújt a 2. táblázatban bemutatottak egyszerűbb kezelésére ciklusok alkalmazásának segítségével, ahol a célfüggvény minimumának hatékony keresésére több, beágyazott megoldó algoritmus tesztelése után megállapítható, hogy erre a feladatra vonatkozóan a GlobalSearch nyújtja a legjobb lehetőséget.

6.2. A GlobalSearch megoldó működése optimumkeresésre

A elővizsgálatok eredménye alapján a GlobalSearch megoldó algoritmus került kiválasztásra a definiált probléma megoldására, amely a MatLab eszköztárában megtalálható algoritmus. A megfelelő paraméterek beállításával általános, nem lineáris, többváltozós függvények szélsőértékei válnak meghatározhatóvá [16]. Az általam a 6.1 fejezetben felvázolt probléma megoldására használt GlobalSearch keresőmotor globális (akár többszörös) minimumok megtalálására alkalmas megoldást biztosít, amely az alkalmazott ciklusváltozó segítségével lehetőséget biztosít a felhasználói igényektől függő algoritmusbővítésre. A megoldó működésének lépései a 11. ábrán kerülnek szemléltetésre.

A GlobalSearch keresőmotorba ágyazott fmincon algoritmus képezi a megvalósított program alapját. Az fmincon egy Newton típusú optimum kereső matematikai módszerrel dolgozik, amely lehetőséget biztosít a megbízhatósági tartományok finomítására. A GlobalSearch szintaktikáját követve meg kell adnunk a két optimalizálandó ismeretlen – esetünkben a τ és az R paraméter – minimális és maximális értékeit, így kijelölve a megoldónak egy olyan tartományt, amelyen belül az optimumkeresés elvégzésre kerülhet. Ezen kívül meg kell adnunk azt is, hogy a két érték optimalizálási folyamatát milyen kiindulási értékről (x_0) kezdje a program, aminek természetesen bele kell esnie az előbb említett tartományba.



11. ábra: GlobalSearch keresőmotor működése.

A szigetelés helyettesítő modelljének meghatározása céljából az időállandókra 0,1...10000 másodperces tartományt határozunk meg, mivel az alkalmazott 4000 másodperces töltési idő és a legnagyobb 2000 másodperces rövidzárási idő esetén a 10000 másodpercnél nagyobb időállandójú folyamatok hatása már nem jelentős a visszatérő feszültség meredekségére. Az ellenállásokat pedig 0...200 GΩ közé korlátozzuk, amellyel a kapacitások lehetséges értékeit is egyértelműen definiáljuk. Ezen határok a gyakorlatban előforduló értékeket biztonsággal magukba foglalják, ugyanakkor ha a későbbiek során ezen paraméterek korlátot jelentenének, könnyűszerrel módosíthatók a beállítások változtatásával. Az fmincon beépített optimumkereső számára megadott kiindulási értéket (x_0) mindkét meghatározandó paraméter esetében a tartományukban felvehető legkisebb érték jelentette. Az x_0 értékekből kiindulva, a célfüggvény feltételeit figyelembe véve az fmincon keresni kezdi a matematikai problémát kielégítő megoldásokat. A NumTrialPonits értékének beállítása a programban azt határozza meg, hogy az fmincon beépített optimumkereső az általunk megadott tartományban hány számkombináció vizsgálatán keresztül keresse megoldást, vagyis hány próbát végezzen optimumkeresésre. A NumTrialPoints beállítása során arra törekedtem, hogy a vizsgálatok megfelelő pontossággal kerüljenek kiértékelésre, így 40000-es értékre állítottam be, ami négyszer nagyobb, mint az előzőekben leírt legnagyobb tartományunk. A következő lépésben a GlobalSearch megtartja különböző vizsgálatok után a legmegfelelőbb próbapontokat, majd ezeket felhasználva fut tovább az fmincon beépített program, a nem megfelelő vizsgálati pontok törlésre kerülnek. Itt is lehetőségünkben áll beállítást végezni a NumStageOnePoints segítségével, ami arra irányul, hogy az előző lépésből a program



hány érték megtartásával menjen tovább. Ez az én beállításaim alapján 1000-re adódik. Végezetül a megoldó az általunk megadható beállítások figyelembevételével, vizsgálatok és értékek kiszűrésének sorozata után eljut a megoldásvektor meghatározásáig, amely vektor a legkisebb hibával képes meghatározni a célfüggvény helyettesítési értékét. A megoldásvektor hossza attól függ, hogy hány Debye-tagra optimalizálunk, de a vektorban szereplő értékek rendre: $[\tau_1, R_1, \tau_2, R_2 \dots \tau_i, R_i]$.

6.3. Az algoritmus validálása

Az algoritmus validálásához megépítettünk 3 darab R-C kört (1,2 és 3 Debye tagokból állókat), melyek különböző szigetelések helyettesítő kapcsolását képzik (4. ábra). A próbaáramkörökbe beépített ellenállások és kondenzátorok pontos értékei precíziós komponens analizátorral kerültek lemérésre azonos frekvencián. Ezen R és C értékeket a 3. táblázat foglalja össze. A validálás minden próbaáramkör esetén úgy zajlott, hogy egy Excel táblázat segítségével (3) és (4) alapján S_{rsz} értékeket számoltunk azokhoz a kisütési időkhöz, töltési időkhöz és töltőfeszültséghez, amelyeket a megvalósított VR módszer alkalmazása során használunk (5.2.1. fejezet), illetve az időállandók(R·C) és ellenállások értékeire a modellekhez tartozó, 3. táblázatban leírt értékeket helyettesítettük, így kaptunk modellenként 16 darab visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredekséget.

3. táblázat: Paraméterek értékei a megépített modellben.

	$C_0[nF]$	$R_0[G\Omega]$	$R_{m1}[G\Omega]$	$C_{m1}[nF]$				
1. model	9,627	5,8705	2,1663	19,5891				
	$C_0[nF]$	$R_0[G\Omega]$	$R_{m1}[G\Omega]$	$C_{m1}[nF]$	$R_{m2}[G\Omega]$	$C_{m2}[nF]$		
2. model	9,627	5,8705	2,1663	10,2368	1,7806	9,4081		
	$C_0[nF]$	$R_0[G\Omega]$	$R_{m1}[G\Omega]$	$C_1[nF]$	$R_{m2}[G\Omega]$	$C_{m2}[nF]$	$R_{m3}[G\Omega]$	$C_{m3}[nF]$
3. model	9,627	58705	2,1663	10,2368	1,7806	9,4081	3,0078	46,2880

A program helyes működésének bizonyítására a kapott S_{rsz} értékeket, mint kalkulált mérési eredményeket bemeneti adatként vittük be a programba. Ebben az esetben pontosan tudtuk, hogy milyen értékű R-C párosoknak kell kijönnie az optimalizálás eredményeképp. Ezzel a módszerrel a mérési hibát is kiküszöböltük, hisz tisztán számított értékek kerültek a programba. A kapott eredményeket a 4-6. táblázat mutatja a különböző tagszámú R-C körökre. A táblázatokban az általunk épített modellekben szereplő R-C értékekből számított (S_{rsz}), és a program által optimalizált R-C értékekből számított visszatérő feszültséggörbe meredekségek értékét (S_{ropt}) hasonlítom össze 16 pontra, valamint a hibát itt is a legkisebb négyzetek módszerével számítom ($\sum(S_{rszi} - S_{ropti})^2$). A 7. táblázatban az S_{rsz} meredekség számításához szükséges, mért R_m - C_m tagok értékei kerülnek összehasonlításra az S_{ropt} érték meghatározásához használt, program



által optimalizált R_{opt} - C_{opt} tagokkal. Az eredmények 4 számjegy pontosságig írtuk a táblázatba.

4. táblázat: 1. modell validálása a teoretikus számolt és optimalizált értékekkel.

1. modell			
tdch [s]	S_{rsz} [V/s]	S_{ropt} [V/s]	hiba [-]
1	46,83347	46,83346	4,54E-11
2	45,74274	45,74273	3,08E-11
4	43,6369	43,6369	1,11E-11
6	41,62801	41,628	1,73E-12
8	39,7116	39,7116	2,8E-13
10	37,88341	37,88341	4,87E-12
15	33,67273	33,67274	3,3E-11
20	29,93007	29,93008	7,16E-11
30	23,64647	23,64648	1,44E-10
50	14,75991	14,75992	0,0000
75	8,188986	8,188999	0,0000
100	4,543356	4,543365	0,0000
150	1,398524	1,398528	2E-11
200	0,43049	0,430492	3,46E-12
300	0,04079	0,04079	7,18E-14
500	0,000366	0,000366	1,64E-17
			8,09E-10

5. táblázat: 2. modell validálása a teoretikus számolt és optimalizált értékekkel.

2. modell			
tdch [s]	S_{rsz} [V/s]	S_{ropt} [V/s]	hiba [-]
1	100,7923	100,7923	3,89E-10
2	95,58673	95,58672	1,02E-10
4	85,98188	85,98188	2,14E-11
6	77,35857	77,35858	2,1E-10
8	69,6149	69,61492	4,27E-10
10	62,65971	62,65974	5,8E-10
15	48,20685	48,20688	6,26E-10
20	37,13707	37,13709	4,29E-10
30	22,12758	22,12759	1,1E-10
50	7,979435	7,979439	1,67E-11
75	2,29236	2,292368	5,52E-11
100	0,676797	0,676805	5,94E-11
150	0,062897	0,0629	9,25E-12
200	0,006189	0,006189	4,69E-13
300	6,49E-05	6,49E-05	3,33E-16
500	7,75E-09	7,75E-09	2,76E-23
			3,04E-09



6. táblázat: 3. modell validálása a teoretikus számolt és optimalizált értékekkel.

3. modell			
tdch [s]	S _{rsz} [V/s]	S _{ropt} [V/s]	hiba [-]
1	135,0715	135,0709	3,33E-07
2	129,6215	129,6213	3,81E-08
4	119,5329	119,5332	7,46E-08
6	110,4325	110,433	2,05E-07
8	102,2183	102,2187	1,96E-07
10	94,79905	94,79937	1,01E-07
15	79,21414	79,21396	3,03E-08
20	67,05153	67,05094	3,43E-07
30	49,96951	49,96882	4,77E-07
50	32,09568	32,09618	2,55E-07
75	22,44427	22,44511	7,01E-07
100	17,51621	17,51614	4,95E-09
150	11,8215	11,82052	9,72E-07
200	8,217025	8,216676	1,22E-07
300	4,003668	4,004454	6,19E-07
500	0,951871	0,952578	5E-07
			4,97E-06

7. táblázat: Mért és az algoritmus által számolt R-C tagok összehasonlítása a validálás első szempontjából.

1. modell					2. modell				3. modell					
	R _m [GΩ]	R _{opt} [GΩ]	C _m [nF]	C _{opt} [nF]		R _m [GΩ]	R _{opt} [GΩ]	C _m [nF]	C _{opt} [nF]		R _m [GΩ]	R _{opt} [GΩ]	C _m [nF]	C _{opt} [nF]
1. R-C tag	2,166	2,166	19,59	19,59	1. R-C tag	1,781	1,780	9,408	9,411	1. R-C tag	1,781	1,660	10,24	10,19
					2. R-C tag	2,166	2,167	10,24	10,23	2. R-C tag	3,008	3,010	46,29	46,28
										3. R-C tag	2,166	2,376	9,408	9,469

Az eredmények láttán megállapíthatjuk, hogy a program működése ezen szempont szerint végzett validálás alapján megfelelő, mivel a 4-6. táblázatban a legnagyobb hibával rendelkező számítás során is 10^{-6} nagyságrendű az eltérésnégyzetösszeg, ami nagyon pontos optimalizálást mutat. A kapott eredmény messzemenően kielégíti a gyakorlati igényeket, VR mérésre használt műszer pontosságát nagyságrendekkel meghaladja. A 7. táblázat is ezeket az eredményeket támasztja alá, hiszen az előző 3 táblázat értékeit ezen paraméterek felhasználásával határoztuk meg. A kiértékelést követően az is látszik, hogy a legnagyobb hibát a legnagyobb számú R-C tagos



modellnél figyelhetjük meg, vagyis ahol a programnak a legtöbb ismeretlenre (3 ellenállás és 3 kapacitás) kell optimalizálnia.

A validálás következő lépése az általunk készített modellek méréses úton történő reprodukálása a továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszerrel, hiszen a helyettesítő kapcsolások külső áramkörben ugyanazokat a feszültségválaszokat hozzák létre, mint a helyettesített szigetelés. A mérés eredményeként 16 állandó kisütési időhöz tartozó, modellenként más visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredekségeit kaptuk. Ezeket az eredményeket bevittem a programba bemenő adatként, majd lefuttattam a programot mind 3 mérési eredményosra. A kapott R és C értékeket szintén egy Excel táblázatban kezeltem, ahol minden modellre kiszámoltam a 16 visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredekségét a (3), (4) egyenlet alapján, amely végül összehasonlításra került a mérési hibával terhelt VR mérés során kapott értékekkel. Ebben az esetben lényeges, hogy mérési hibával is kell számolnunk, aminek belül kell esnie a program által kiadott értékekkel számolt S_r -eknek. A mérés hibáját úgy kapjuk, hogy az előzőekben bemutatott, mérési hiba nélküli, ideális esetben vett számolt S_{rsz} értékeket vetjük össze a VR módszerrel kapottakkal (S_{rvr}). A 3 mérés hibáját a legkisebb négyzetek módszere alapján meghatározva ($\sum(S_{rszi} - S_{rvri})^2$) a 8. táblázat mutatja.

8. táblázat: A VR mérés hibái (eltérés négyzetösszegei) a számolt értékekhez képest.

	1. modell	2. modell	3. modell
hiba [-]	2,320	23,01	35,99

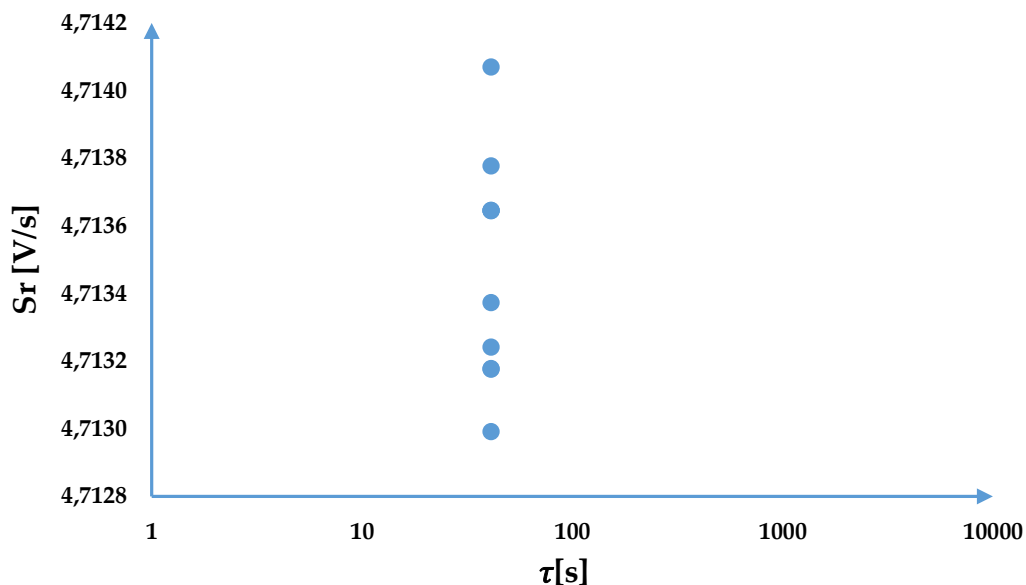
Fontos része volt a validálásnak az is, hogy meg tudjuk határozni, hogy a bevitt mérési adatok hány Debye elemes áramkörrel helyettesíthetők. Ennek megállapítása érdekében a programot úgy állítottam be, hogy minden esetben 10 Debye elemes helyettesítő kapcsolásra optimalizálja az értékeket, azaz 20 ismeretlenre: 10 darab időállandóra és 10 darab ellenállás értékre, jelentősen felülbecsülve a lehetséges R-C tagok számát. A kapott értékekkel táblázatkezelőben minden időállandóhoz S_r értéket számítottam, lebontva, hogy a 10 R-C tag közül, melyik mekkora értékkel járul hozzá (2. táblázat szerint) az előbb említett, MatLAB értékekből kapott S_r -hez. Ezt követően minden esetben ábrázoltam logaritmikus skálán a Debye tagok időállandóit, a különböző tagok számított S_r -hez való hozzájárulásának függvényében. Az ábrázolás során csak az első kisütési időnél (1 s) számolt meredekséghez hozzájáruló 10 S_r értéket vettem figyelembe, amelyek összege (4) egyenlet alapján a számolt S_r . Ennek oka, hogy ez a mérési pont tartalmazza a legszélesebb időtartományban levő kifejlődött polarizációs folyamatokat, ebben van benne az összes polarizációs folyamat által létrehozott visszatérő feszültség. Az eredmények előzőek szerint ábrázolt diagramja azért fontos, mert ennek alapján a Debye tagok száma meghatározható. A 9,11,13. táblázat az optimalizált értékek alapján meghatározott 1 s kisütési időhöz tartozó S_r



értékhez való hozzájárulást mutatja tagonként és modellenként, ezzel párhuzamosan a 12,14,15. ábra pedig a diagramokat.

9. táblázat: 1. modell optimalizált értékei 10 Debye tagra és az ebből számolt meredekségek.

1. MODELL Debye-tagok	Optimalizált értékek		Hozzájárulás $S_r(t_{dch1})$ - hez [V/s]
	Időállandó: τ [s]	Ellenállás: R [G Ω]	
1.	41,09	21,5	4,714
2.	41,09	21,51	4,714
3.	41,09	21,51	4,714
4.	41,09	21,51	4,714
5.	41,09	21,51	4,714
6.	41,09	21,51	4,713
7.	41,09	21,51	4,713
8.	41,09	21,51	4,713
9.	41,09	21,51	4,713
10.	41,09	21,51	4,713
			Σ 47,13



12. ábra: 1. modell: az egyes tagok visszatérő feszültséggörbe meredekséghez való hozzájárulása az időállandó függvényében.

A 9. táblázat alapján megalkotott 12. ábrán látható, hogy mivel az ábrázolt pontok teljesen egymás alatt helyezkednek el, ezért 1 időállandóval jellemezhető a folyamat, azaz leírásához 1 R-C tag elegendő. Ezzel egyértelműen bizonyítottuk, hogy a programba bevitt mérési eredmények alapján a folyamatok 1 Debye taggal modellezhetők. A program akkor működik jól, ha ezt követően 1 R-C tagot engedünk meg a futtasás során, vagyis két ismeretlenre optimalizálunk és az optimalizált



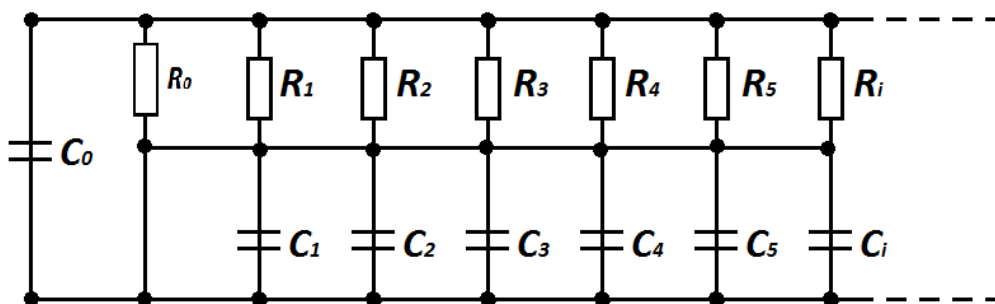
értékeket behelyettesítve (3) és (4) egyenletbe, majd ezzel hibát számolva a mért értékekhez képest a szokásos módszerrel a 8. táblázatban szereplő első modell mérési hibájához képest elhanyagolható hibát kapunk. Az algoritmus által optimalizált R-C értékek összehasonlítása a precíziós komponens analízátorral mért eredményekkel, valamint a hiba értéke a 10. táblázatban található. A modellekhez számolt hiba, ami a VR mérésből származó S_{VR} és optimalizált eredmények helyettesítéséből származó S_r a függelék 19-21. táblázatában került részletezésre.

10. táblázat: 1. modell: kiértékelés 1 Debye tagra.

	1. modell				
	$R_m[G\Omega]$	$R_{opt}[G\Omega]$	$C_m[nF]$	$C_{opt}[nF]$	hiba [-]
1. Debye-tag	2,1663	2,1508	19,5891	19,1064	1,4257

A futtatás után azt tapasztaljuk, hogy a mért és optimalizált értékek közt csekély az eltérés, ebből fakadóan az S_r értékek alapján számított hiba is olyan alacsony, hogy az 1. mérés mérési hibáján belül van. Ezzel az optimalizáló algoritmus ezen szempont alapján is validálásra került.

Az első modellhez tartozó 9. táblázat alapján fontos megemlíteni azt is, hogy mivel szinte teljesen ugyanolyan ellenállás és időállandó értékek jöttek ki, amiből következik, hogy a kapacitások értéke is azonos, a 4. ábrán szereplő helyettesítő kapcsolás ekvipotenciális pontokat tartalmaz, azaz 10 R-C tag esetén átköthető, ezt mutatja a 13. ábra.



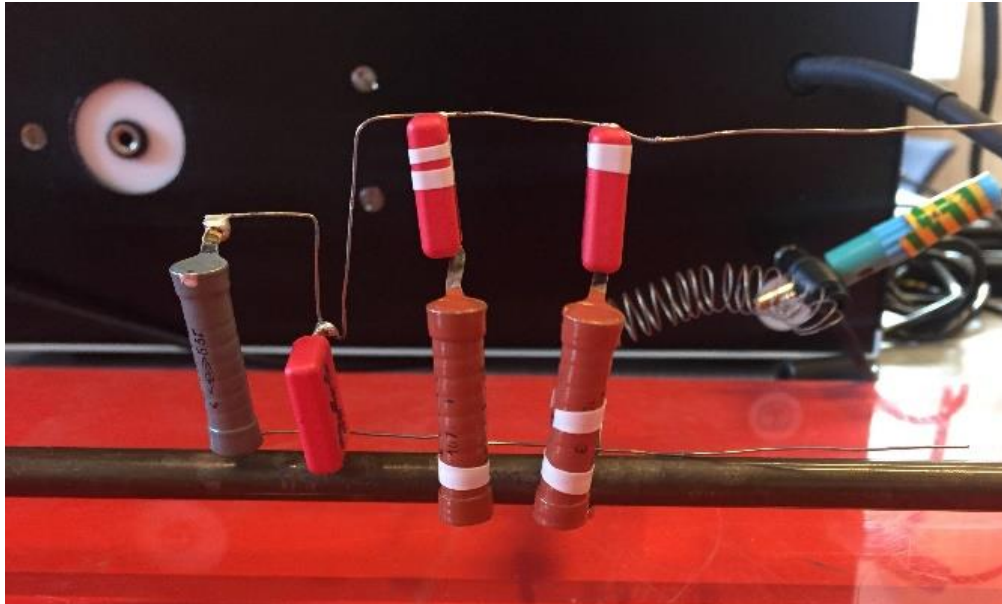
13. ábra: 1. modell program által 10 R-C tagra optimalizált értékei alapján a helyettesítő kapcsolás.

A 13. ábrán a párhuzamosan kapcsolt ellenállások eredője replusz művelettel határozható meg, a párhuzamosan kapcsolt kondenzátorok eredője pedig összegzéssel adódik ki. Ezeket a műveleteket elvégezve a 9. táblázatban szereplő 10 darab ellenállás pontos értékeivel, és az egyes időállandók, valamint az ezekhez tartozó ellenállások hányadosaként megkapott kapacitásokkal éppen a 10. táblázatban szereplő optimalizált értékeket kapjuk, ezzel egy további módon bizonyítva a feltevésünket.

A két Debye tagot tartalmazó 2. modellre történő optimalizálás helyességének ellenőrzését is az előbbieken ismertetett folyamat végrehajtásával végeztem. A 2.



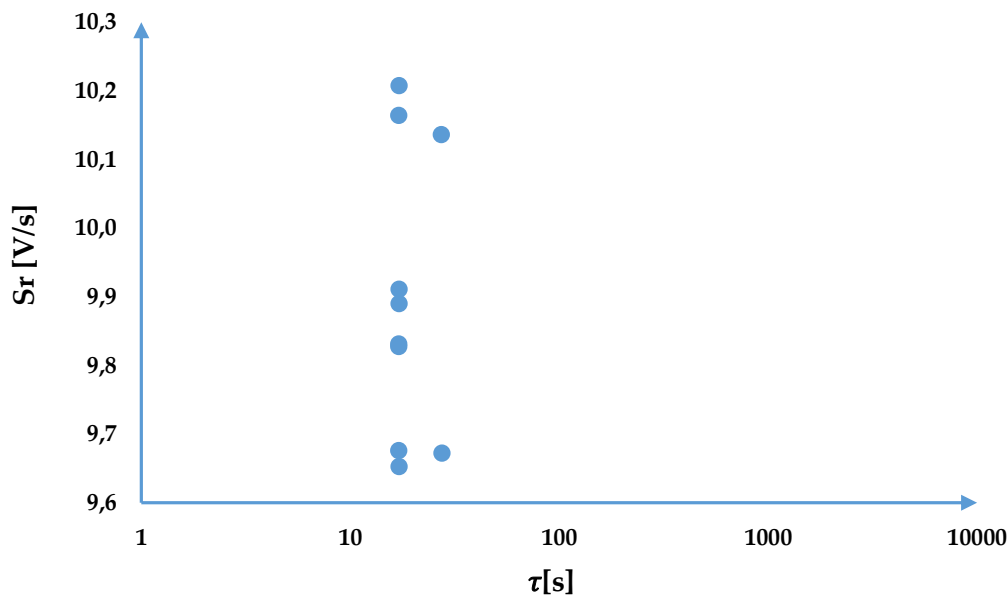
próbaáramkör VR mérés közben a 14. ábrán látható, ezen mérés során kapott eredményekkel a program lefuttatásra került 10 R-C tagra, majd ábrázoltam az optimalizált eredményekből Excel táblázatban kiszámolt tagonkénti S_r értékeket az első kisütési időnél az időállandó függvényében, az adatok a 11. táblázatban, a diagram a 15. ábrán látható.



14. ábra: A VR mérés 2 R-C tagos modell esetén.

11. táblázat: 2. modell optimalizált értékei 10 Debye tagra és az ebből számolt meredekségek.

2. MODELL Debye- tagok	Optimalizált értékek		Hozzájárulás $S_r(t_{dch1})$ - hez [V/s]
	Időállandó: τ [s]	Ellenállás: R [G Ω]	
1.	17,12	9,907	9,890
2.	17,10	10,13	9,676
3.	17,08	9,639	10,16
4.	17,10	9,966	9,831
5.	17,13	10,15	9,652
6.	27,26	9,879	10,14
7.	17,14	9,599	10,21
8.	27,46	10,36	9,672
9.	17,11	9,698	9,827
10.	17,14	9,889	9,911
			Σ 98,97



15. ábra: 2. modell: az egyes tagok visszatérő feszültséggörbe meredekséghez való hozzájárulása az időállandó függvényében.

A 15. ábrán szereplő diagramban azt láthatjuk, hogy a 2. modell esetében az optimalizálóprogramot 10 R-C tagra lefuttatva 2 időállandóval lehet jellemezni a folyamatot. Ezen megállapítás miatt a programot lefuttattam 2 Debye tagra, azaz 4 ismeretlenre, így ellenőrizve, hogy ebben az esetben is megfelelően működik-e az algoritmus, hisz tudjuk, hogy ezen mérési eredmények két R-C taghoz tartoznak. Az eredményeket a 12. táblázat tartalmazza.

12. táblázat: 2. modell: kiértékelés 2 Debye tagra.

	2. modell				
	$R_m[G\Omega]$	$R_{opt}[G\Omega]$	$C_m[nF]$	$C_{opt}[nF]$	hiba [-]
1. Debye-tag	1,7806	1,6363	9,4081	9,8475	0,7216
2. Debye-tag	2,1663	2,0795	10,2368	10,3918	

A kiértékelést követően látjuk, hogy valóban két R-C taggal írható le a folyamat, hiszen az optimalizált értékekkel kapott görbe meredekségek, és a mért értékek hibája a legkisebb négyzetek módszerével meghatározva jóval kisebb az ugyanilyen elven számított mérési hibához képest (8. táblázat). Felmerül a kérdés, hogy két R-C tag esetén viszonylag közel esnének egymáshoz a munkapontok a diagramban, ebből fakadóan lehet-e helyettesíteni a folyamatot egy R-C taggal. Ennek megválaszolására a program a két Debye elemes mérési eredményekkel egy R-C tagra, vagyis 2 ismeretlenre is lefuttatásra került. Ekkor az optimalizált értékekkel számított S_r értékek és a VR mérés során kapottak közt a hiba jóval nagyobb volt, mint a mérés hibája, így

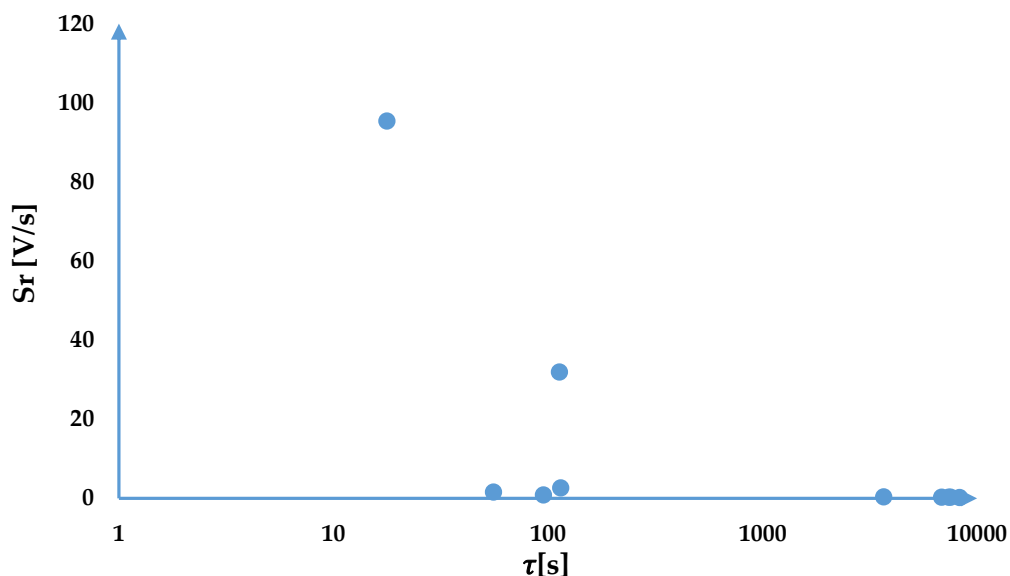


biztosan állítható, hogy az optimális Debye elemszám a kettő, amit eredetileg a 15. ábráról kiolvastunk.

A 3. modell 3 R-C taggal való helyettesítésének bizonyítására az előzőekben alkalmazott gondolatmeneten végighaladva a 13. táblázat alapján megvalósuló 16. ábra szolgál.

13. táblázat: 3. modell optimalizált értékei 10 Debye tagra és az ebből számolt meredekségek.

3. MODELL Debye-tagok	Optimalizált értékek		Hozzájárulás $S_r(t_{ach1})$ - hez [V/s]
	Időállandó: τ [s]	Ellenállás: R [G Ω]	
1.	8283,4	189,66	0,2097
2.	7391,7	178,33	0,2434
3.	3679,4	189,74	0,3628
4.	114,85	39,104	2,6333
5.	17,800	1,030	95,3142
6.	95,430	122,05	0,8422
7.	6832,22	187,39	0,2456
8.	7533,7	183,18	0,2336
9.	113,31	3,2289	31,887
10.	55,810	64,818	1,5741
			Σ 133,55



16. ábra: 3. modell: az egyes tagok visszatérő feszültséggörbe meredekséghez való hozzájárulása az időállandó függvényében.

A 3. modell esetében az időállandó, visszatérő feszültségválasz meredekség diagramon a pontok elhelyezkedése már nem annyira szabályos, mint az előző két esetben volt, ez annak is a következménye, hogy ennél a mérésnél volt észlelhető a



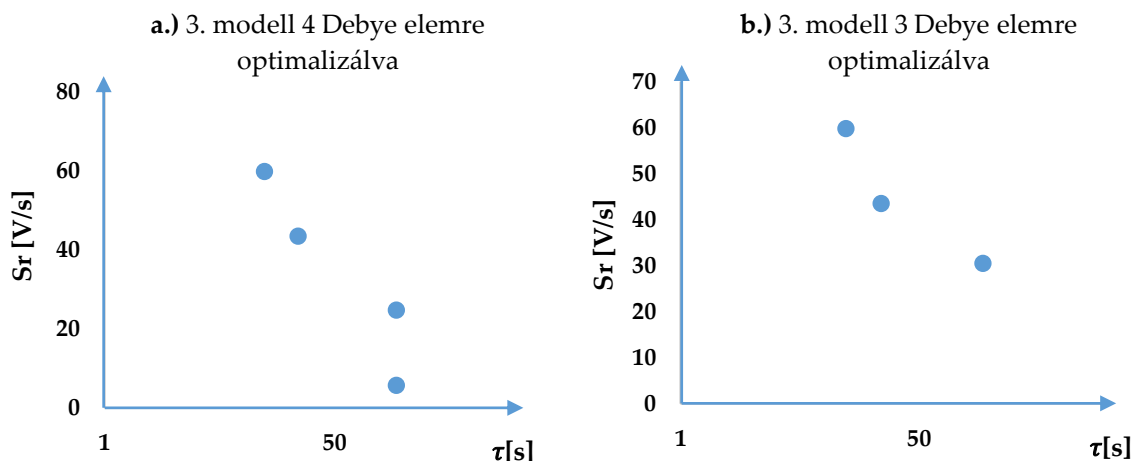
legnagyobb mérési hiba. A diagramon azonban jól látszik, hogy 3 időállandó körül sűrűsödnek a mérési pontok, amely megadja a 3 R-C tagra való redukálhatóság lehetőségét. Ennél a modellnél a 13. táblázatban érdemes még megfigyelni az utolsó oszlopban levő, egyes tagok általi hozzájárulást S_r -hez, és látható, hogy 3 meghatározó érték van, ami jelentősebben hozzájárul a többinél az utolsó oszlop utolsó sorában található összegzett értékhez, a többi tag hozzájárulása ezekhez képest szinte elhanyagolható. Ez is mutatja, hogy az előző feltevés helyes. A mérési eredmények 3 R-C tagra való lefuttatása utáni eredményeket a 14. táblázat tartalmazza.

3. modell					
	$R_m[G\Omega]$	$R_{opt}[G\Omega]$	$C_m[nF]$	$C_{opt}[nF]$	hiba [-]
1. Debye-tag	1,7806	1,6263	9,4081	9,3091	0,6209
2. Debye-tag	2,1663	2,3035	10,237	11,685	
3. Debye-tag	3,0078	3,3893	46,288	42,280	

14. táblázat: 3. modell: kiértékelés 3 Debye tagra.

A kapott hiba az optimalizált értékekből számított S_r és a 3. mérés során kapott meredekségek közt jóval a mérési hiba alatt van, így a 3 modellnél is validálásra került a program.

A 16. ábrán való pontok szórása miatt ellenőriztem az algoritmust 4 R-C tagra is, hiszen az általam alkalmazott módszer a sűrűsödési pontokra akár több lépésben is elvégezhető, lényege az, hogy végeredményképp azt a tagszámú R-C párost kapjuk, ami a mérési eredmények alapján a legpontosabban írja le a dielektrikumot roncsoló polarizációs folyamatokat. A 3 és 4 Debye elemes optimalizálás $\tau - S_r(\tau_{dch1})$ diagramjai a 17. ábrán láthatóak.



17. ábra: a.) 4 Debye elemes modell b.) 3 Debye elemes modell esetén az egyes tagok visszatérő feszültséggörbe meredekséghez való hozzájárulása az időállandó függvényében.



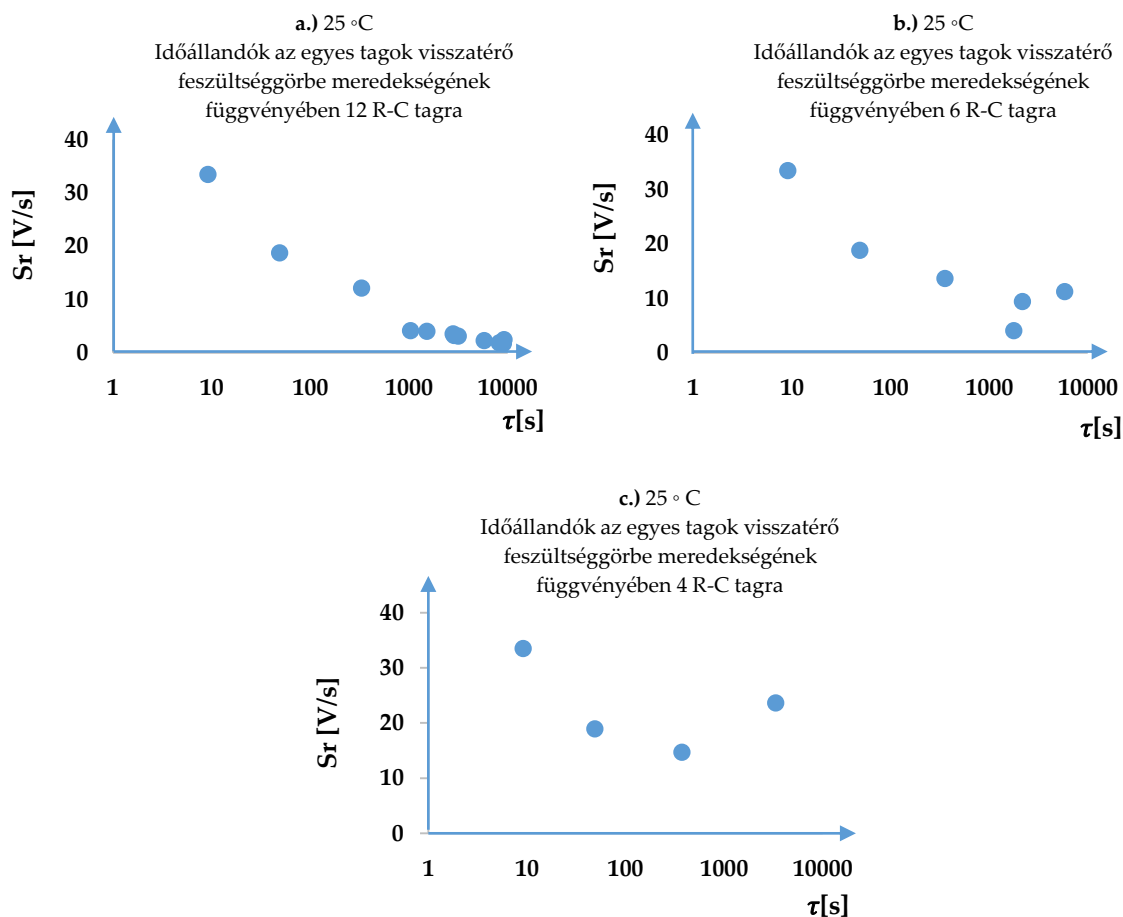
A diagramokból azt látjuk, hogy ha a 10 R-C tagra való optimalizálás után, ha 4 R-C tagra futtattuk volna a programot, akkor is a 3 Debye elemes megoldást találtuk volna optimálisnak, hiszen 3 sűrűsödési pont lehető fel az időállandók szempontjából a 16. ábra a.) diagramján, vagyis 2 pont helyettesíthető 1 időállandóval. Az ábra b.) részével is alá tudjuk támasztani ezt a kijelentést, mivel itt már egyértelműen nem tudjuk a 3 sűrűsödési pontot tovább redukálni, ami 3 különböző időállandót jelent a folyamat szempontjából.

A program validálása az előbbiek alapján sikeresnek bizonyult, tehát az algoritmus segítségével a mérési eredmények programba való implementálásával, mérési hibán belül meghatározható a folyamatokat leíró R-C tagok optimális száma, és ebben az optimális esetben felvett értéke. Az algoritmus használható szigeteléseken végzett mérések szigetelés helyettesítő kapcsolásának meghatározására. A következő fejezetben transzformátor szigetelés különböző hőmérsékleten történő VR méréséből származó eredmények programban való lefutását végeztem és ennek eredményeit elemzem.

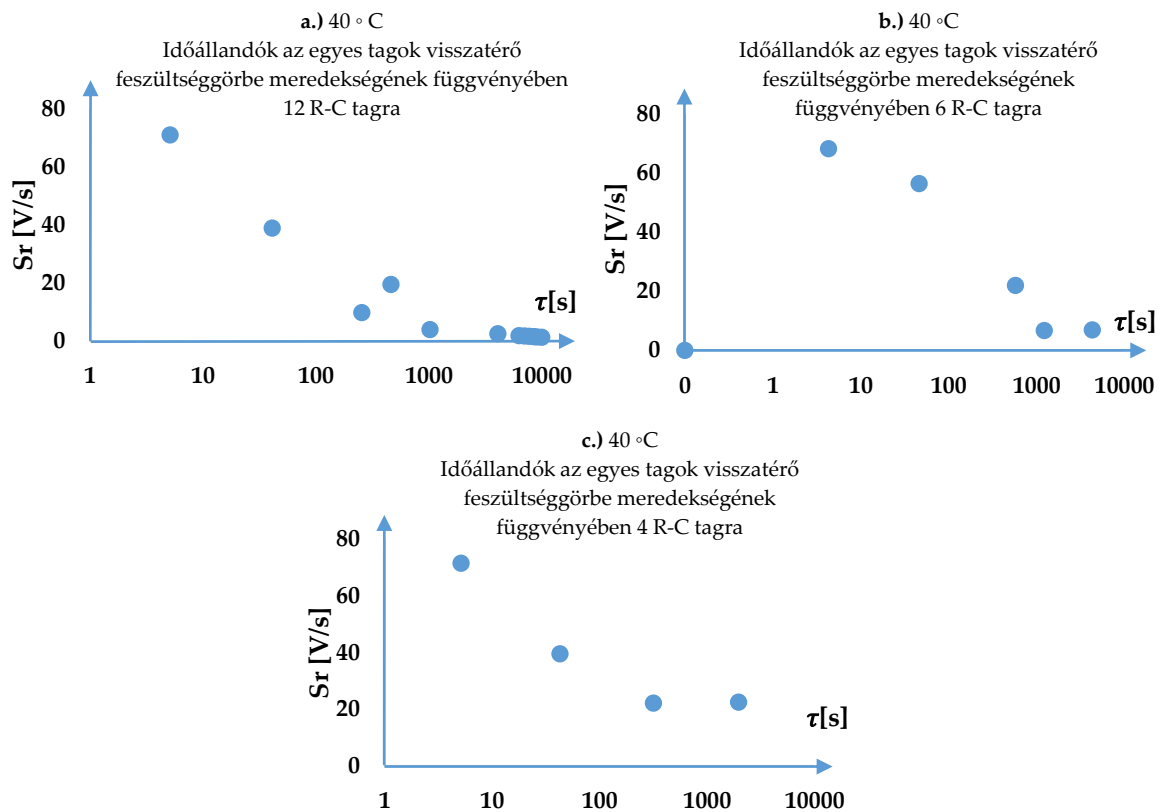


7. Transzformátor szigetelés vizsgálata az algoritmus használatával

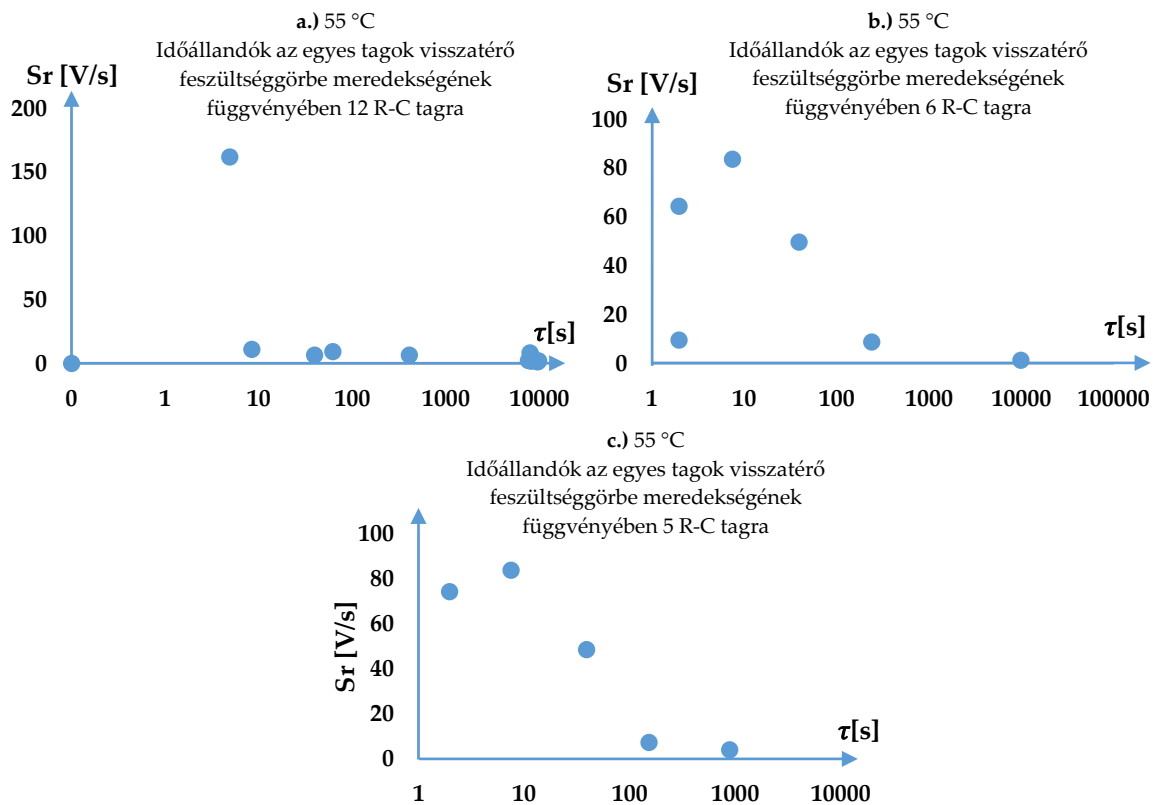
A mérések egy 4 tekercses transzformátoron lettek elvégezve 25, 40, 55 és 70 °C-os hőmérsékleten. A feladatom az volt, hogy a különböző hőmérsékleten kapott VR mérési eredményekből meghatározzam a dielerktromos folyamatokat leíró R-C tagok optimális számát és értékét. A különbség az előzőekben felvázoltakhoz képest az volt, hogy itt mind a 20 kisütési időt felhasználtam az algoritmus futtatása során, ami azt jelenti, hogy a bemeneti paraméterek alkotta két vektor 20-20 elemből áll, aminek átírásán kívül más dolgunk nem volt, hiszen a program ezen vektorok hosszaiig fut minden esetben. A geometriai kapacitás $C_0 = 1,236 \text{ nF}$ volt, valamint első lépésben 12 R-C tagra futtattam a programot 10 tag helyett, hogy biztosan megfelelően nagy tartományt biztosítsak. A GlobalSearch keresőmotor által biztosított beállítható paramétereket (NumTrialPoints, NumStageOnePoint, tartományok stb.) a 6.2. fejezetben leírtak alapján alkalmaztam ebben az esetben is, azonos peremfeltételek biztosítva minden méréshez való optimalizáláshoz. A következő ábrákon és táblázatokban a 12 Debye tagról való redukálás folyamatát mutatom be, elérve az optimális R-C tagszámokig és értékekig az előző fejezetben bizonyított módszerrel.



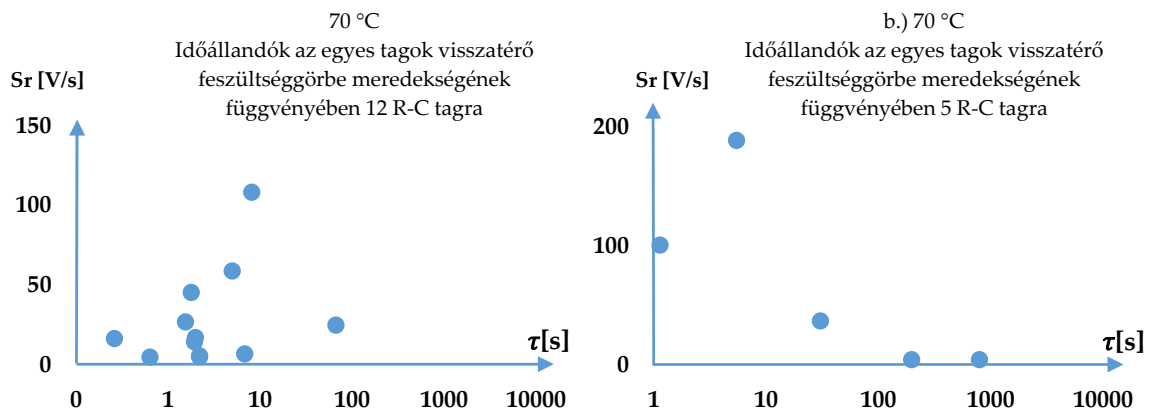
18. ábra: 25 °C-on mért eredmények a.) 12 R-C tagra b.) 6 R-C tagra c.) optimális 4 R-C tagra lefuttatva.



19. ábra: 40 °C-on mért eredmények a.) 12 R-C tagra b.) 6 R-C tagra c.) optimális 4 R-C tagra lefuttatva.



20. ábra: 55 °C-on mért eredmények a.) 12 R-C tagra b.) 6 R-C tagra c.) optimális 5 R-C tagra lefuttatva.



21. ábra: 70 °C-on mért eredmények a.) 12 R-C tagra b.) optimális 5 R-C tagra lefuttatva.

25 °C-hoz tartozó Debye tagok	τ [s]
1.	49,12
2.	375,39
3.	9,174
4.	3551,97

15. táblázat: 25 °C esetén az optimális tagok időállandói.

40 °C-hoz tartozó Debye tagok	τ [s]
1.	5,146
2.	318,09
3.	1968,9
4.	42,98

16. táblázat: 40 °C esetén az optimális tagok időállandói.

55 °C-hoz tartozó Debye tagok	τ [s]
1.	39,223
2.	1,979
3.	7,529
4.	153,012
5.	889,60

17. táblázat: 55 °C esetén az optimális tagok időállandói.

70 °C-hoz tartozó Debye tagok	τ [s]
1.	1,146
2.	30,779
3.	799,98
4.	5,505
5.	198,66

18. táblázat: 70 °C esetén az optimális tagok időállandói.



A kapott eredmények azt mutatják, hogy 25 és 40 °C-os hőmérsékletek esetében a 12 R-C tagtól kezdve 2 lépésben jutunk el a legpontosabb megoldásig és mindkét esetben 4 R-C tagos modellig tudunk javítani a folyamat leírásának pontosságában. 55 valamint 70 °C esetén az optimális R-C tagszám már 5, ahova az utóbbi hőmérsékletnél 1 lépéssel eljutunk a kiindulási Debye elemektől, az előbbi esetében a lépések száma 2. A tagok csökkentésénél a hibák minden esetben egyre kisebbek, mígnem eltérjük az optimális R-C tag számot, amely hibáját már nem lehet csökkenteni. Lefuttatásra került több eset, amely olyan számú R-C tagokra optimalizált, amik a diagramok alapján kizárásra kerültek. Ezekben az esetekben bebizonyosodott, hogy nagyobb hibákat kapunk, mint a megfelelő számú soros R-C taggal rendelkező modell esetében.

Fontos megállapítás az is, hogy magasabb hőmérsékleten magasabb számú Debye elemmel írható le a folyamat a transzformátor szigetelésén végzett VR mérés eredményeiből kiindulva. Valamint a 15-18. táblázatban szereplő időállandókból látszik, hogy magasabb hőmérsékleteken a modell időállandói a kisebb időállandók felé csúsznak, azaz a polarizációs folyamatok hatása eltolódik a nagyobb frekvenciák irányába. Ez azzal magyarázható, hogy magasabb hőmérsékleteken a polarizációs folyamatok intenzitása nő, ami a modell alapján is alátámasztást nyert[17]. Az optimális R-C tagok időállandói a különböző hőmérsékleteken egy diagramban a függelékben a 22. ábrán található, ahol nyomon követhető a hőmérséklet növekedésével való eltolódásuk.

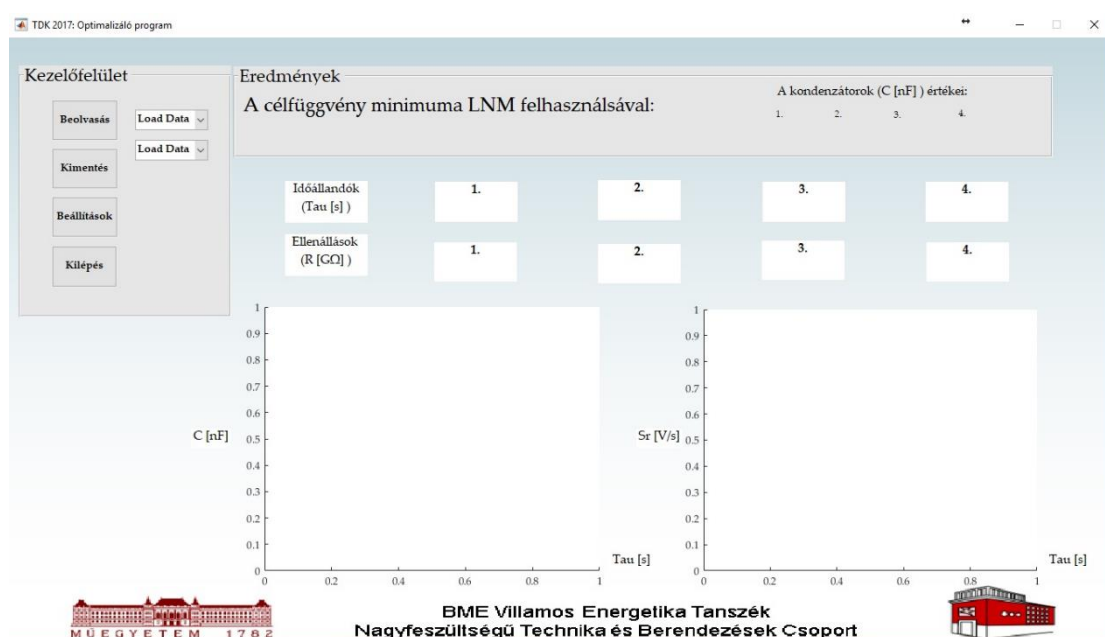
A berendezés folyamatos diagnosztizálása során a mérés eredményeinek programban történő kiértékeléseivel nyomon követhető a polarizációs folyamatok dielektrikumban való változása, ezzel a romlási folyamatok jobban felmérhetővé válnak. Ehhez nyújt segítséget egy felhasználóbarát, az előbbieken bemutatott optimalizáló algoritmussal összeköttetésben álló kezelőfelület, ami a 8. fejezetben kerül kifejtésre.



8. A felhasználói felület

A programhoz készült felhasználói felület lehetőséget nyújt a mérési adatok egyszerűbb kezelhetőségére, ami a diagnosztizálás szempontjából nagy előnyt jelent. A kezelőfelület összeköttetésben van a megírt algoritmussal, használata során csupán egy, a mérés adatait tartalmazó előre strukturált Excel fájlra van szükségünk. A beolvasás gombra kattintva a számítógépen található mérési eredményeket tartalmazó Excel fájl kiválasztható, ami beolvasásra kerül. A beolvasást követően az optimalizáló algoritmus meghatározza a keresendő paramétereket, melyek a kapacitással együtt kiírásra kerülnek az eredmények panelen. Az általam összeállított elrendezésben 4 R - C tagra fut le a program a beolvasást követően, de lehetőségünk van a tagok számának módosítására a felhasználói igények függvényében. A mentés gomb segítségével az eredményeket kimenthetjük Excel fájlként a további adatfeldolgozások érdekében. A legörülő menün keresztül diagramokat rajzoltathatunk ki, akár többet is egyszerre az eredmények egyidejű összehasonlítása érdekében. A beállítások gomb arra szolgál, hogy szükség esetén a GlobalSearch keresőmotorban megadható peremfeltételeket módosítsuk.

A felhasználói felület lehetőséget nyújt a dielektromos folyamatok egyszerű és azonnali vizsgálatára. Az igények függvényében a program online monitorozással is bővíthető erre a célra szolgáló scriptek megírásával. Ebből kifolyólag számos további lehetőség létezik a felhasználói felület funkcióinak továbbfejlesztésére vonatkozóan. Az általam összeállított funkciókkal rendelkező felhasználói program a 22. ábrán látható.



22. ábra: A felhasználói felület.



9. Összegzés

A nagyfeszültségű hálózat berendezéseinek diagnosztizálása nagyon fontos feladat a váratlan kiesések és anyagi károk megelőzés érdekében. A villamos berendezések nagy részének üzembiztonsági szempontból az egyik legkritikusabb része a szigetelés, amelynek folyamatos állapotellenőrzése elengedhetetlen. Dolgozatomban a szigetelés diagnosztizálására használt teljes feszültségválasz módszerrel kapott eredményekből állítottam fel modellt a dielektrikumban lezajló dielektromos folyamatokra nézve, melynek validálása több megközelítéssel is sikeresnek bizonyult, újabb eszközt adva a dielektrikum állapotának felmérésére. Az algoritmus a bevitt mérési eredmények alapján megadja, hogy a helyettesítő modell hány R-C tagból áll és ezek milyen értékekkel rendelkeznek, amiből a helyettesítő kapcsolat egyértelműen meghatározható. Roncsolásmentes diagnosztikus mérés eredményei alapján az optimalizáló algoritmus segítségével felállított modellből tehát következtetni lehet a dielektromos folyamatok változására, ebből a romlási folyamatok mértékére, az idő elteltével való változására, majd végül közvetett módon a szigetelés villamos szilárdágára. Ha a villamos szilárdság már nem megfelelő, a szigetelés nem tudja megfelelően ellátni feladatát, megnő a kockázat, hogy a villamos erőterben kialakuló térerősség hatására a szigetelésben átütés, vagy a felületén átívelés kialakul, amit az üzemeltetés során el kell kerülni.

Az algoritmus könnyebb használhatósága érdekében a keresőprogramhoz felhasználói felület készült. Ennek használata egyszerűbbé teszi a felhasználó számára a modell meghatározását, hiszen egy gombnyomásra betöltésre kerülnek az Excel táblázatból a mérési eredmények a program bementét képző két vektorba. Az optimalizálás végeztével az eredmények a felhasználói panelen jelennek meg, amik kimentésére külön funkció szolgál, így nem a MatLAB által optimalizált eredményvektorból kell elvégeznünk az eredmények implementálását a számunkra adatkezelés szempontjából legcélszerűbb Excel fájlba. A felhasználói felület olyan kezdeményezés, ami egyszerűbbé teszi a mérési eredmények, vagy modell paramétereinek kezelését, csökkenti az emberi hiba kockázatát. A funkciók igényekhez és különböző berendezések diagnosztizálásához igazíthatók, vagy akár ezek együttesének a programban való megvalósítása globális használatra adhat lehetőséget a jövőben.

Összességében a felhasználói felületbe ágyazott optimalizáló program könnyen használható eszközt nyújt -a villamos szigetelésen feszültségválasz mérés elvégzését követően- a helyes diagnosztizálási eredmény meghatározásához a dielektromos folyamatok feltárása szempontjából. Ebből fakadóan a váratlan meghibásodások száma csökkenthető, a biztonság növelhető.



10. Függelék

10.1. Az alkalmazott MatLAB programkód

```
clear all;
clc;
% Bemeneti adatok:
tdch = [1,2,4,6,8,10,15,20,30,50,75,100,150,200,300,500];
meres=
[47.76;46.458;43.153;41.717;39.697;37.662;33.207;29.496;23.241;14.522;8.029;4.479;1.429;0.454;
0.073;0.001];
C0=9.627;
tc=4000;
% Kereső motor:
gs=GlobalSearch('XTolerance',1e-6,'FunctionTolerance',1e-
6,'NumTrialPoints',10000,'NumStageOnePoints',1000);%beállítások megadása
for i=1:length(tdch)
syms tau r x
F(i) = ((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,i)/(tau)))/(r*C0)); %visszatérő feszültség
kezdeti meredekségét megadó képlet
F1(i) = subs(F(i), {'tau', 'r'}, {'x(1)', 'x(2)'}); %1. R-C taghoz bevezetett változók (a
páratlan szám az argumentumban az időállandót, a páros mindig az ellenállást jelöli)
F2(i) =subs(F(i), {'tau', 'r'}, {'x(3)', 'x(4)'}); %2. R-C taghoz bevezetett változók
F3(i) =subs(F(i), {'tau', 'r'}, {'x(5)', 'x(6)'}); %3. R-C taghoz bevezetett változók
F4(i) =subs(F(i), {'tau', 'r'}, {'x(7)', 'x(8)'}); %4. R-C taghoz bevezetett változók
F5(i) = subs(F(i), {'tau', 'r'}, {'x(9)', 'x(10)'}); %5. R-C taghoz bevezetett változók
F6(i) =subs(F(i), {'tau', 'r'}, {'x(11)', 'x(12)'}); %6. R-C taghoz bevezetett változók
F7(i) =subs(F(i), {'tau', 'r'}, {'x(13)', 'x(14)'}); %7. R-C taghoz bevezetett változók
F8(i) =subs(F(i), {'tau', 'r'}, {'x(15)', 'x(16)'}); %8. R-C taghoz bevezetett változók
F9(i) = subs(F(i), {'tau', 'r'}, {'x(17)', 'x(18)'}); %9. R-C taghoz bevezetett változók
F10(i) =subs(F(i), {'tau', 'r'}, {'x(19)', 'x(20)'}); %10. R-C taghoz bevezetett változók
hiba(i) = (F1(i)+F2(i)+F3(i)+F4(i)+F5(i)+F6(i)+F7(i)+F8(i)+F9(i)+F10(i)-meres(i,1))^2;%hiba
meghatározása legkisebb négyzetek módszerével, futóváltoó használatával
end

vege=sum(hiba);%egyes tagokból származó hibák összegzése, ez a célfüggvény
sixmin = matlabFunction(vege,'vars',{x});%fmincon beágyazása, Xo, valamint az optimalizálandó
paraméterek tartományának megadása
problem =
createOptimProblem('fmincon','x0',[0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0
],...

'objective',sixmin,'lb',[0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0,0.1,0], 'ub',[10
000,200,10000,200,10000,200,10000,200,10000,200,10000,200,10000,200,10000,200,10000,200,10000
,200]);
[xmin,fmin,flag,oupt,allmins]=run(gs,problem);%fminconhoz tartozó szintaktika
c(1,1)=(xmin(1,1)/xmin(1,2)); %kapacitások értékeinek kiszámolása tauból és R-ből
c(1,2)=(xmin(1,3)/xmin(1,4));
c(1,3)=(xmin(1,5)/xmin(1,6));
c(1,4)=(xmin(1,7)/xmin(1,8));
c(1,5)=(xmin(1,9)/xmin(1,10));
c(1,6)=(xmin(1,11)/xmin(1,12));
c(1,7)=(xmin(1,13)/xmin(1,14));
c(1,8)=(xmin(1,15)/xmin(1,16));
c(1,9)=(xmin(1,17)/xmin(1,18));
c(1,10)=(xmin(1,19)/xmin(1,20));

v(1,1)=double(c(1,1)); %kapacitások kiírása egy oszlopvektorba a könnyebb kezelhetőség miatt
v(2,1)=double(c(1,2));
v(3,1)=double(c(1,3));
v(4,1)=double(c(1,4));
v(5,1)=double(c(1,5));
v(6,1)=double(c(1,6));
v(7,1)=double(c(1,7));
v(8,1)=double(c(1,8));
v(9,1)=double(c(1,9));
v(10,1)=double(c(1,10));

tau(1,1)=xmin(1,1); %időállandók kiírása táblázatba
tau(1,2)=xmin(1,3);
tau(1,3)=xmin(1,5);
tau(1,4)=xmin(1,7);
tau(1,5)=xmin(1,9);
```



```
tau(1,6)=xmin(1,11);
tau(1,7)=xmin(1,13);
tau(1,8)=xmin(1,15);
tau(1,9)=xmin(1,17);
tau(1,10)=xmin(1,19);

r(1,1)=xmin(1,2); %Ellenállások kiíratása táblázatba tau mellé
r(1,2)=xmin(1,4);
r(1,3)=xmin(1,6);
r(1,4)=xmin(1,8);
r(1,5)=xmin(1,10);
r(1,6)=xmin(1,12);
r(1,7)=xmin(1,14);
r(1,8)=xmin(1,16);
r(1,9)=xmin(1,18);
r(1,10)=xmin(1,20);

w(1,1)=double(r(1,1)); %ellenállások kiíratása oszlopvektorba a könnyebb kezelhetőség miatt
w(2,1)=double(r(1,2));
w(3,1)=double(r(1,3));
w(4,1)=double(r(1,4));
w(5,1)=double(r(1,5));
w(6,1)=double(r(1,6));
w(7,1)=double(r(1,7));
w(8,1)=double(r(1,8));
w(9,1)=double(r(1,9));
w(10,1)=double(r(1,10));

xmin(2,2)=c(1,1); %kapacitások kiíratása táblázatban a már szereplő ellenállások alá
xmin(2,4)=c(1,2);
xmin(2,6)=c(1,3);
xmin(2,8)=c(1,4);
xmin(2,10)=c(1,5);
xmin(2,12)=c(1,6);
xmin(2,14)=c(1,7);
xmin(2,16)=c(1,8);
xmin(2,18)=c(1,9);
xmin(2,20)=c(1,10);

for k=1:length(tdch)%optimalizált értékek behelyettesítése R-C tagonként Sr képletébe
futóváltozóval, így megkapjuk a tagok hozzájárulását a mért Sr-ekhez
syms tau r
er1(k) = subs(((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,k)/(tau)))/(r*C0)), [tau, r], [xmin(1,1),
xmin(1,2)]);
er2(k) = subs(((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,k)/(tau)))/(r*C0)), [tau, r], [xmin(1,3),
xmin(1,4)]);
er3(k) = subs(((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,k)/(tau)))/(r*C0)), [tau, r], [xmin(1,5),
xmin(1,6)]);
er4(k) = subs(((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,k)/(tau)))/(r*C0)), [tau, r], [xmin(1,7),
xmin(1,8)]);
er5(k) = subs(((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,k)/(tau)))/(r*C0)), [tau, r], [xmin(1,9),
xmin(1,10)]);
er6(k) = subs(((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,k)/(tau)))/(r*C0)), [tau, r], [xmin(1,11),
xmin(1,12)]);
er7(k) = subs(((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,k)/(tau)))/(r*C0)), [tau, r], [xmin(1,13),
xmin(1,14)]);
er8(k) = subs(((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,k)/(tau)))/(r*C0)), [tau, r], [xmin(1,15),
xmin(1,16)]);
er9(k) = subs(((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,k)/(tau)))/(r*C0)), [tau, r], [xmin(1,17),
xmin(1,18)]);
er10(k) = subs(((1000*(1-exp(-tc/(tau)))*exp(-tdch(1,k)/(tau)))/(r*C0)), [tau, r],
[xmin(1,19), xmin(1,20)]);
er1final(k) = double(er1(k)); %a helyettesítéssel kapott eredmények átkonvertálása double-be
er2final(k) = double(er2(k)); er3final(k) = double(er3(k)); er4final(k) = double(er4(k));
er5final(k) = double(er5(k)); er6final(k) = double(er6(k)); er7final(k) = double(er7(k));
er8final(k) = double(er8(k)); er9final(k) = double(er9(k)); er10final(k) = double(er10(k));
A(1,k) = er1final(k); %tagonkénti Sr-ek kiíratása egy mátrixba minden tagra, minden mérési
ponthoz
A(2,k) = er2final(k); A(3,k) = er3final(k); A(4,k) = er4final(k); A(5,k) = er5final(k); A(6,k)
= er6final(k); A(7,k) = er7final(k); A(8,k) = er8final(k); A(9,k) = er9final(k);
A(10,k) = er10final(k);
end
```



10.2. Hibaszámítás bemutatása

19. táblázat: Hiba számítás az első modell esetén a VR mérésből kapott és az optimalizált eredményekkel kapott meredekség esetén.

t_{dch}	S_{rvr}	S_r	$(S_{rvr}-S_r)^2$		t_{dch}	S_{rvr}	S_r	$(S_{rvr}-S_r)^2$
1	47,76	47,13473	0,390959		30	23,241	23,27341	0,00105
2	46,458	46,00158	0,208321		50	14,522	14,30519	0,047006
4	43,153	43,81634	0,440021		75	8,029	7,785488	0,059298
6	41,717	41,73491	0,000321		100	4,479	4,237191	0,058472
8	39,697	39,75235	0,003064		150	1,429	1,255054	0,030257
10	37,662	37,86398	0,040795		200	0,454	0,371746	0,006766
15	33,207	33,52623	0,101905		300	0,073	0,032615	0,001631
20	29,496	29,68541	0,035877		500	0,001	0,000251	5,61E-07
								1,425743

20. táblázat: Hiba számítás a második modell esetén a VR mérésből kapott és az optimalizált eredményekkel kapott meredekség esetén.

t_{dch}	S_{rvr}	S_r	$(S_{rvr}-S_r)^2$		t_{dch}	S_{rvr}	S_r	$(S_{rvr}-S_r)^2$
1	98,786	98,96883	0,033428		30	21,546	21,40451	0,020019
2	93,485	93,76524	0,078535		50	7,912	7,823385	0,007853
4	84,833	84,18411	0,421052		75	2,318	2,373807	0,003114
6	75,677	75,60605	0,005033		100	0,72	0,774875	0,003011
8	68,024	67,92422	0,009957		150	0,069	0,098665	0,00088
10	60,888	61,04328	0,024112		200	0,014	0,014485	2,35E-07
15	46,472	46,80894	0,113532		300	0,026	0,00036	0,000657
20	35,956	35,97515	0,000367		500	0,001	2,41E-07	1E-06
								0,721552

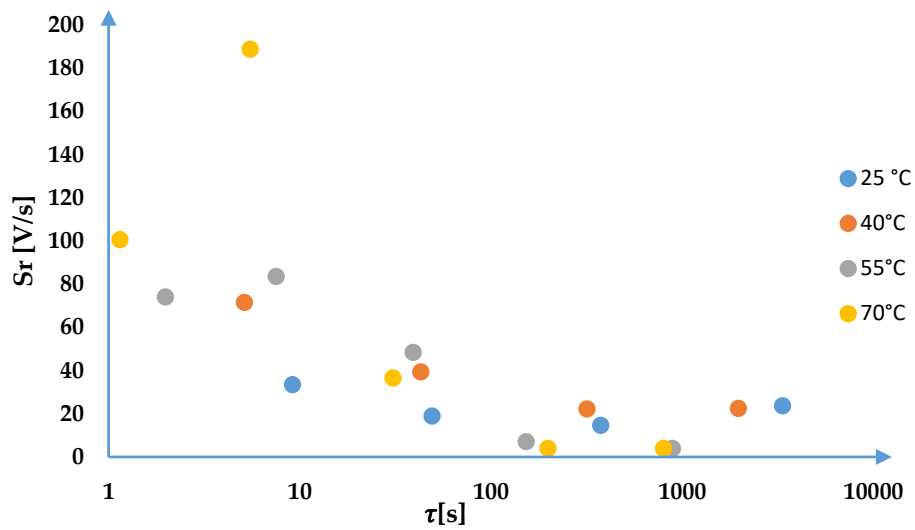
21. táblázat: Hiba számítás a második modell esetén a VR mérésből kapott és az optimalizált eredményekkel kapott meredekség esetén.

t_{dch}	S_{rvr}	S_r	$(S_{rvr}-S_r)^2$		t_{dch}	S_{rvr}	S_r	$(S_{rvr}-S_r)^2$
1	133,529	133,6715	0,020317		30	48,625	48,4569	0,028257
2	128,043	128,0538	0,000117		50	31,257	31,00671	0,062646
4	117,659	117,7112	0,002724		75	21,111	21,38948	0,07755
6	108,684	108,4461	0,056588		100	16,426	16,43651	0,000111
8	100,426	100,1371	0,083475		150	11,051	10,93404	0,013679
10	92,752	92,67679	0,005657		200	7,65	7,617134	0,00108
15	76,645	77,14426	0,249262		300	3,718	3,778005	0,003601
20	65,032	65,14927	0,013752		500	0,89	0,935508	0,002071
								0,620886

22. táblázat: Hiba számítás a harmadik modell esetén a VR mérésből kapott és az optimalizált eredményekkel kapott meredekség esetén.



10.3. Transzformátormérés időállandói



23. ábra: Transzformátor VR mérése alapján a különböző hőmérsékletekhez meghatározott optimális R-C tagokhoz tartozó időállandók eltolódása.



Irodalomjegyzék

- [1] Giuseppe M. Urbani and R. S. Brooks, "Using the Recovery voltage method to evaluate aging in oil-paper insulation," in *International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectric*, 1998.
- [2] Zoltán Ádám Tamus, "Complex diagnostics of insulating materials in industrial electrostatics," *J. Electrostat.*, pp. 154–157, 2009.
- [3] Luspay Ödön, *Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata*. Budapest, 2000.
- [4] Zoltán Ádám Tamus and Gergely Márk Csányi, "Modeling of insulations by the results of voltage response measurement," 2015.
- [5] Szirmai Ágnes, "Transzformátor szigetelésmodell dielektromos jellemzőinek vizsgálata," in *TDK dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Energetika szekció*, 2015.
- [6] Tapan Kumar Saha, "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers," 2003, pp. 903–917.
- [7] Endre Németh, "Proposed fundamental characteristics describing dielectric processes in dielectrics," *Period. Polytech. Electr. Eng.*, pp. 305–322, 1971.
- [8] Tamus Zoltán Ádám, "Komplex szigetelésdiagnosztika alkalmazása kiefeszültségű kábelekre," *PhD értekezés*, pp. 1–14, 57–59, 2010.
- [9] V. szigeteléstechika Műszeroldal, "<https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/villamosszigetelestechika.pdf>." Budapest, pp. 5–8, 2014.
- [10] Tapan Kumar Saha, "Review of time-domain polarization measurements for assessing insulation condition in aged transformers," 2003.
- [11] Zoltán Ádám Tamus and Gergely Márk Csányi, "Characterization of dielectric materials by the extension of voltage response method," *J. Phys. Conf. Ser. Electrostat.*, 2015.
- [12] Zoltán Ádám Tamus, Ágnes Szirmai, and Bálint Németh, "Comparison of voltage response and return voltage measurements of a transformer insulation model," 2015.
- [13] Ágnes Szirmai and Zoltán Ádám Tamus, "Modelling of dielectric process in oil-paper insulation for replacement of Return Voltage Measurement," 2016.
- [14] Endre Németh, "Measuring voltage response: a non-destructive diagnostic test method of hv insulation," 1999, pp. 249–252.
- [15] Fekete Norbert, "Feszültségválasz-mérő műszer fejlesztése," *Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vill. és Inform. Kar, Vill. Energ. Tanszék*, pp. 1–27, 2011.
- [16] Stoyan Gisbert, *MATLAB*. Budapest, 2011.
- [17] Gergely Márk Csányi and Zoltán Ádám Tamus, "Temperature dependence of conductive and polarization process of pvc cable," in *June 2014.*, pp. 299–302.