



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Veres Dániel

F5FGQW

**Olaj-papír szigetelésű nagyfeszültségű kondenzátor  
időtartománybeli és frekvenciatartománybeli  
vizsgálata impulzusgenerátor modellezéséhez**

TDK dolgozat

KONZULENS

Cselkó Richárd

egyetemi tanársegéd

Villamos Energetika Tanszék

Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

BUDAPEST, 2015

# Összefoglaló

---

A TDK dolgozatomban a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nagyfeszültségű Laboratóriumában található áramlökő berendezés valós helyettesítő képének meghatározását tűztem ki célul. Ennek a valós villamos modellnek a meghatározása azért fontos, mert az áramlökő berendezést a laboratóriumban különböző vizsgálatokra használják és egy kívánt vizsgáló jelalak a valós helyettesítő kép ismerete nélkül nem egyezik meg a valós kiadott jelalakkal. Ha azonban ismerjük a helyettesítő képet és a vizsgált eszköz modelljét, akkor úgy tudjuk beállítani az áramlökő berendezés paramétereit, hogy a jelalak tényleg megegyezzen a szükségessé. Az áramlökő működésének egyik különlegessége ebből a szempontból, hogy az alkalmazott kondenzátorok olajpapír dielektrikumának permittivitása az alkalmazott tartományban erőteljesen frekvenciafüggő.

A munkám kezdetén a laboratóriumban található berendezések felépítését, működését ismertem meg magyar és angol nyelvű szakirodalmak tanulmányozásán keresztül. Ezután az áramlökő berendezés lökőkondenzátorát kezdtem el vizsgálni, ezen végeztem el különböző méréseket. Az időtartománybeli méréseket bekapcsolási és kikapcsolási görbék felvételével kezdtem, majd egy (ebben a tartományban frekvenciafüggetlen) szén-dioxid szigetelésű kondenzátor segítségével áttöltési méréseket végeztem. A mérési eredményeket felhasználva Matlab segítségével szimulációkat végeztem. A mérési és a szimulált eredmények közötti különbségek alapján a Matlabba bevitt villamos helyettesítő képet finomítani tudtam és így egyre pontosabb eredményre jutottam.

Egy másik módszer segítségével frekvenciatartományban is végeztem méréseket. Ehhez egy szélessávú függvénygenerátort, a lökőkondenzátort, frekvenciafüggetlen ellenállást és oszcilloszkópot használtam. Sok különböző frekvencián megvizsgáltam az ellenállás és a kondenzátor feszültségét és feljegyeztem a köztük lévő fáziskülönbséget is. Ez alapján a lökőkondenzátorra az adott frekvenciára fel lehet írni egy soros vagy párhuzamos R-C helyettesítő képet, amely az addig már kialakult polarizációk hatását tartalmazza, a nagyobb időállandójúak hatását még nem. Így a sok R-C helyettesítő kép felhasználásával meg lehet határozni a permittivitás frekvenciafüggését és így fel lehet rajzolni egy valós helyettesítő képet a kondenzátorra, amely tartalmazza az összes polarizációs hatást.

# Abstract

---

In my work my goal is to define the electric model of the current impulse generator of the High Voltage Laboratory of the Budapest University of Technology and Economics. It is important to know the real electric parameters of the impulse generator, because various measurements are performed in the laboratory with it; without an appropriate model, the shape of the real current impulse is different from the desired one. However, if the real model is known, the parameters of the generator can be adjusted to result the expected waveform. The specialty of the current impulse generator is that the permittivity of the applied oil-paper insulator in the discharge capacitor is strongly frequency dependent in the relevant frequency band.

My work started with reviewing high number of references about high voltage laboratory equipment. After that I carried out various measurements on the oil insulated discharge capacitor in the High Voltage Laboratory. In time domain I performed switch-on, switch-off and transfer measurements. I applied a carbon dioxide insulated capacitor for the transfer measurement because this capacitor type is frequency independent in this range. Based on the results I established an electric model of the capacitor. I implemented a simulation in Matlab with a simple model and then I compared the simulation and the results of the laboratory measurements. Based on the experiences I was able to improve the electric model.

With another measurement method I performed investigations in frequency domain. The oil-paper insulated capacitor, a wideband signal generator and a frequency-independent resistor were used in the measurement. I made a multi-frequency measurement and measured the voltage of the resistor, the voltage of the capacitor and the angle between the two vectors. At every frequency I was able to establish a series/parallel R-C electric model which contains the effect of polarization modes that could form at that dedicated frequency. After that I could establish the permittivity-frequency curve and with the help of the curve I could define the electric model of the impulse generator which contains all of the polarization effects.

## Tartalomjegyzék

Összefoglaló.....	2
Abstract .....	3
1 Elméleti alapok .....	5
1.1 Polarizáció és permittivitás [1] [2] [6] .....	5
1.2 Szigetelések valós helyettesítő képe .....	8
2 Mérések időtartományban.....	9
3 Szimuláció Matlab segítségével.....	15
4 Mérések frekvenciatartományban .....	17
5 Áramlökő modellezése .....	22
5.1 Az áramlökő felépítése és működése.....	22
6 Összegzés.....	25
Irodalomjegyzék .....	26
Ábrajegyzék .....	27

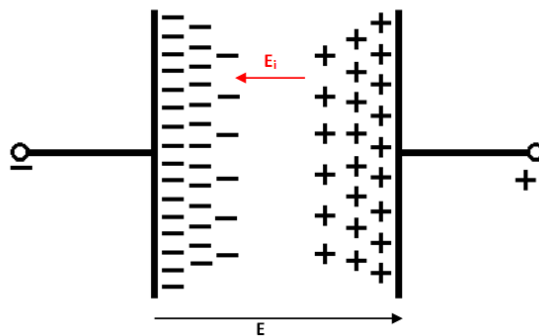
# 1 Elméleti alapok

## 1.1 Polarizáció és permittivitás [1] [2] [6]

A szigetelőanyagokban lévő dipólusok térerősség hatására rendeződnek, esetleg egy térrészben felhalmozódhatnak. A villamos erőtér hatására a töltéshordozók elmozdulnak, majd a villamos tér megszűnése után visszaállnak nyugalmi helyzetükbe. Ezt a jelenséget nevezzük polarizációnak. A szigetelőanyagok a környezetük felé semlegesek maradnak, de dipólussá válnak. Leginkább szilárd szigetelőanyagokban jellemző jelenség, de tértöltés-polarizációról folyadékok esetében is beszélhetünk.

Szilárd szigetelőanyagokban sokféle polarizáció létezik, például: elektroneltolódási, ioneltolódási, hőmérsékleti, állandó dipólusok, hőmérsékleti orientációs, rugalmas orientációs, tértöltéses és határréteg. Egy szigetelőanyagban egyszerre többféle polarizáció is kialakulhat. A kialakuláshoz szükséges idő függhet a frekvenciától, hőmérséklettől, a dipólusok tömegétől, térerősség nagyságától, permittivitástól. A kialakulási idő széles időskálát lefed, az elektroneltolódási polarizációnál ez körülbelül  $10^{-15}$  s, míg a tértöltéses polarizáció kialakulási ideje a több órát, de akár a napokat is elérheti. A különböző időállandójú polarizációk vizsgálatára a szigetelésdiagnosztikában különböző módszerek vannak.

Folyadékok esetén jellemző a tértöltéses polarizáció. Ideális szigetelőanyagban nem jönnek létre, mivel szükség van arra, hogy a szigetelő ellenállása véges legyen.



**1. ábra: Tértöltés-polarizáció**

A folyadékban található ionok az elektródok között a tér hatására az elektródok felé vándorolnak és ott felhalmozódnak. Így az eredeti térerősséggel ( $E$ ) ellentétes irányú belső térerősséget hoznak létre ( $E_i$ ). Az ionoknak időre van szükségük ahhoz, hogy az elektródok felé áramoljanak, így nagy frekvenciák esetén erről a jelenségről nem beszélhetünk. Ha a hőmérsékletet növeljük, akkor a részecskék mozgásának az amplitúdója is nő, a polarizáció kialakulásához szükséges idő csökken.

A permittivitás egy anyagra jellemző állandó (adott körülmények mellett). A szigetelőre ható külső elektromos tér ( $E$ ) hatására az anyagban a töltéseloszlás megváltozik, ezt jellemzi az elektromos eltolás ( $D$ ). A kettő között teremt kapcsolatot a permittivitás ( $D=\epsilon E$ ).

A szigetelőtől független, külső térerősségen kívül megjelenik az anyagban a polarizáció miatt létrejövő polarizációs térerősség is. A kettő összegét belső térerősségnek nevezzük. A belső térerősséget megkapjuk az alábbi képlet segítségével:

$$E_b = E \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{3 \cdot \varepsilon_0}\right) = \frac{\varepsilon_r + 2}{3} \cdot E$$

A képletben  $\varepsilon_0$  a vákuum-permittivitás,  $\varepsilon_r$  a relatív permittivitás,  $\varepsilon$  pedig a relatív permittivitás és a vákuum-permittivitás szorzata.

Az anyagokban keletkező eredő polarizációt részekre bontva írhatjuk fel:

$$P = P_f + P_k + P_s$$

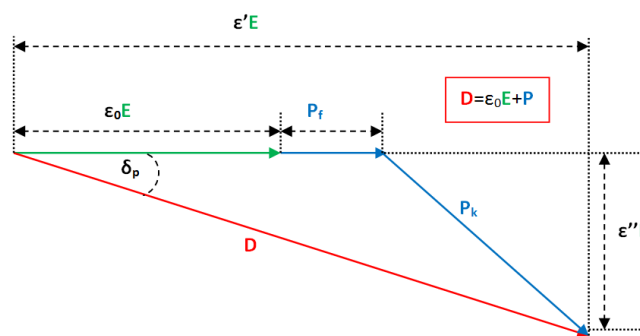
$P_f$  azokat a polarizációkat jelöli, melyeknek a kialakulásukhoz szükséges idő rövid, így a nagyfrekvenciás változást is követni tudják. Ha egy adott időtartamban vizsgáljuk a szigetelő viselkedését, akkor  $P_k$  jelöli azokat a polarizációkat, melyek a kiválasztott időtartományban képesek kialakulni.  $P_s$  kialakulása a kiválasztott időtartományhoz képest lassú, ezért a vizsgálat során nincs jelentősége.

A polarizációt kifejezhetjük a térerősség segítségével is:

$$P = (\varepsilon - \varepsilon_0) \cdot E$$

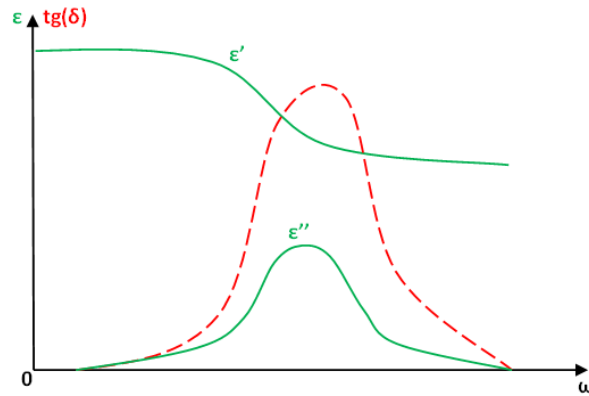
A képletben  $\varepsilon_0$  a vákuum-permittivitás,  $\varepsilon$  pedig a relatív permittivitás és a vákuum-permittivitás szorzata. Mindhárom polarizációtípushoz azonos indexű permittivitás is tartozik. Ha fizikai megfontolásból indulunk ki, akkor a polarizáció a dipólusnyomaték sűrűségét adja.

A polarizáció a valóságban nincs fázisban a térerősséggel (fáziskésésben van hozzá képest), így a köztük kapcsolatot teremtő permittivitás egy komplex szám:  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ . Az elektromos eltolást a komplex permittivitás segítségével értelmezve az alábbi fazorábrát kapjuk:



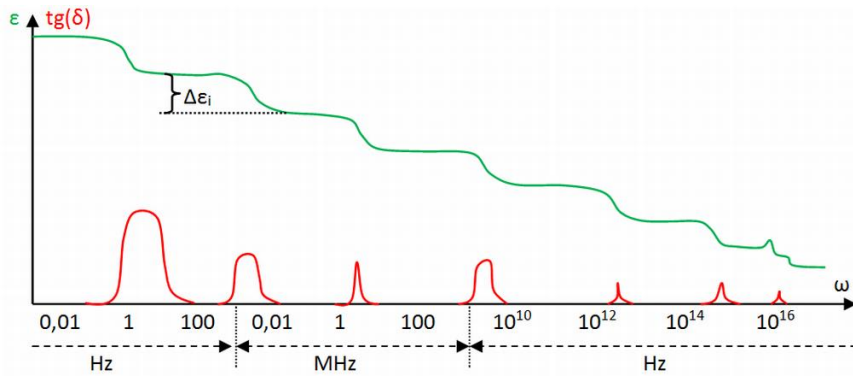
**2. ábra: A komplex permittivitás, D, E és P összefüggése**

A polarizáció fáziskésését a  $\delta_p$  fázisszöggel írhatjuk le, amelynek tangense megegyezik a permittivitás képzetes és valós részeinek hányadosával. A permittivitás valós részének abszolút értéke sokkal nagyobb, mint a képzetes részé, ezért közelítőleg a permittivitás a valós résszel egyenlő. A permittivitásnak mindkét összetevője függ a frekvenciától.



**3. ábra: A permittivitás és a tgδ frekvenciafüggése**

Láthatjuk, hogy a permittitás valós része (ami közelíti az eredő permittitás) lépcsőszerűen csökken, és a lépcsőnél van a tgδ maximuma. Ha kiterjesztjük a frekvenciasávot, akkor láthatjuk, hogy több lépcső is kialakul és mindegyikhez egy-egy tgδ maximum tartozik.

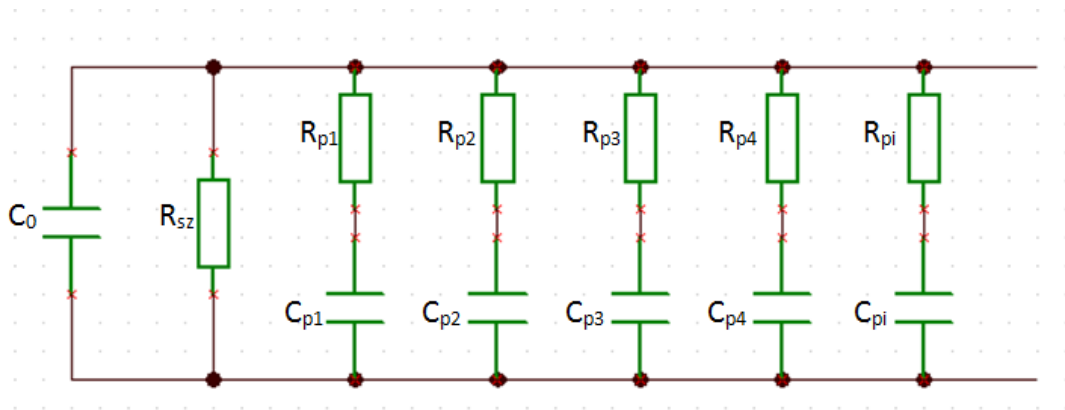


**4. ábra: A permittitás és tgδ változása széles frekvenciatartományban**

Az egyes lépcsők közti különbség ( $\Delta\epsilon_i$ ) az adott frekvencián végbemenő polarizáció hatására bekövetkező permittitás-növekmény, melyet szuszceptibilitásnak is neveznek.

A permittitás frekvencia- és hőmérsékletfüggése egymással kölcsönhatásban van. A hőmérséklet csökkenése hasonló hatással van a permittitás képzetes és valós összetevőire, mint a frekvencia növekedése. A valós összetevő lépcsője és a képzetes rész maximuma ott van, ahol a feszültség periódusideje és az adott polarizáció időállandója megegyezik, tehát a lépcsők ott helyezkednek el, ahol a végbemenő polarizációs folyamatok időállandójából számított frekvenciák vannak.

## 1.2 Szigetelések valós helyettesítő képe



**5. ábra: A szigetelések valós helyettesítő kapcsolása**

A villamos térben lévő szigeteléseket a valóságban nem lehet egy egyszerű kondenzátorral modellezni, mert nem ideális szigetelők, így valamekkora szivárgási áram folyik rajtuk, valamint a polarizációk hatását is figyelembe kell vennünk. Az 5. ábrán látható kapcsolásban a  $C_0$  a valós geometriai kialakításból adódó kapacitást jelenti,  $R_{sz}$  pedig a szivárgási ellenállást. A soros tagok kapacitása reprezentálja egy-egy polarizációs folyamat lekötött töltését. Az R-C tagok a különböző időállandójú polarizációkat diszkrétan reprezentálják, ahol  $\tau_{pi} = R_{pi}C_{pi}$ . Ez a helyettesítő kapcsolás DC és AC esetben is helyesen reprezentálja a folyamatokat.

Azért fontos ismernünk egy szigetelés valós helyettesítő képét, mert a polarizációs folyamatok töltéseket kötnek le és ennek jelentős hatásai lehetnek. Így például az áramlökő berendezés lökőkondenzátorának tulajdonságai miatt nem minden esetben azt a hullámalakot kapjuk az áramlökő kimenetén, amire számítanánk a valós kép ismerete nélkül. A valóságban az történik, hogy nem áll rendelkezésre rögtön az összes töltés, így egy kisebb amplitúdójú elnyújtott hullámalakot kapunk az ideálishoz képest. A valóságos és az ideális görbe alatti terület ugyanakkora, mert a görbe integrálja az össztöltéssel egyezik meg, ami állandó.

A valós helyettesítő kapcsolás segítségével a szigetelőanyagban lejátszódó dielektromos folyamatok modellezhetőek, mert a kapcsolás az áramkörben ugyanolyan áram- és feszültségviszonyokat hoz létre, mint a szigetelőanyag valós esetben.



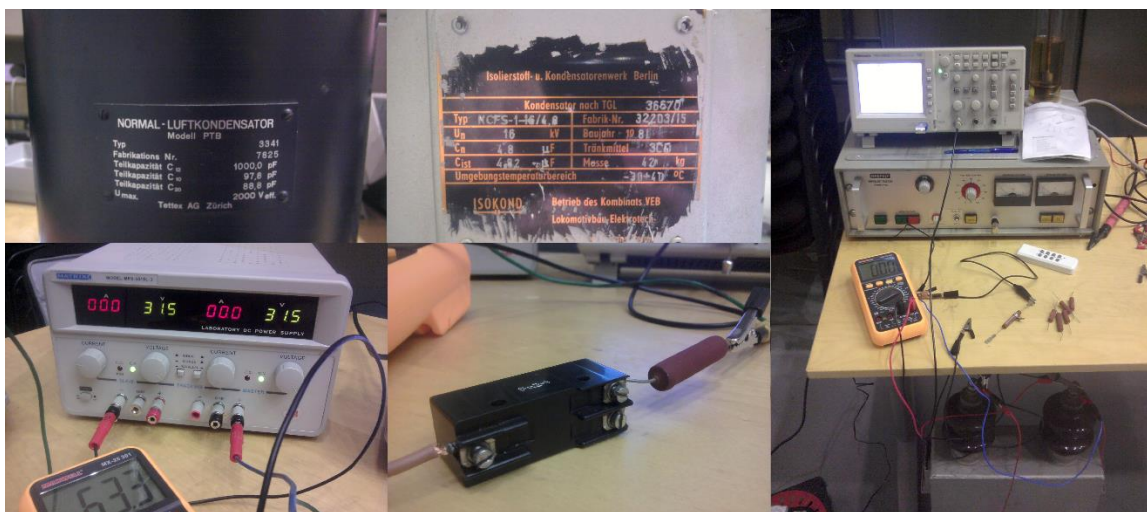
## 2 Mérések időtartományban

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nagyfeszültségű Laboratóriumában végeztem el a munkám mérésekkel kapcsolatos részeit. A laboratóriumban található egy nagyáramú áramlökő berendezés, melyet különböző eszközvizsgálatokra alkalmaznak. Az áramlökő berendezés a vizsgálatokhoz különféle áramokat tud generálni, többek között 8/20  $\mu$ s-os lökőhullámú áramimpulzust vagy akár az üzemi igénybevétel vizsgálatához az üzemi feszültségre szuperponált lökőimpulzusokat. Az áramlökő berendezés valós helyettesítő képének meghatározását tűztem ki célul. Egy kívánt vizsgáló jelalak a valós helyettesítő kép ismerete nélkül nem egyezik meg a valós kiadott jelalakkal. Ha azonban ismerjük a helyettesítő képet és a vizsgált eszköz modelljét, akkor úgy tudjuk beállítani az áramlökő berendezés paramétereit, hogy a jelalak tényleg megegyezzen a szükségessel. Az áramlökő működésének egyik különlegessége ebből a szempontból, hogy az alkalmazott lökőkondenzátorok olaj-papír dielektrikumának permittivitása az alkalmazott tartományban erőteljesen frekvenciafüggő.

Eleinte be- és kikapcsolási méréseket végeztem, majd később egy ebben a tartományban frekvenciafüggetlen szén-dioxid szigetelésű kondenzátor segítségével áttöltési méréseket végeztem.

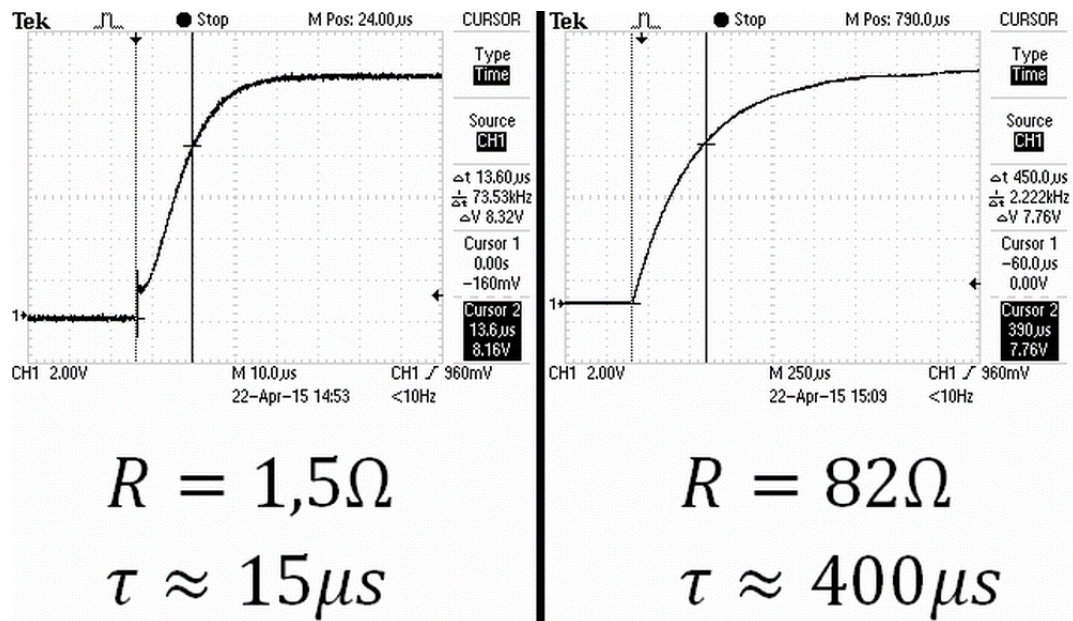
A laboratóriumi mérések során a következő eszközöket használtam:

- VEB Isokond 4,8  $\mu$ F kapacitású olaj-papír szigetelésű kondenzátor
- Tettex AG 1000 pF kapacitású szén-dioxid szigetelésű kondenzátor
- Normally-on, normally-off mikrokapcsoló
- Tektronix kétcsatornás digitális oszcilloszkóp
- Matrix kétcsatornás DC tápegység
- Ellenállások, mérővezetékek



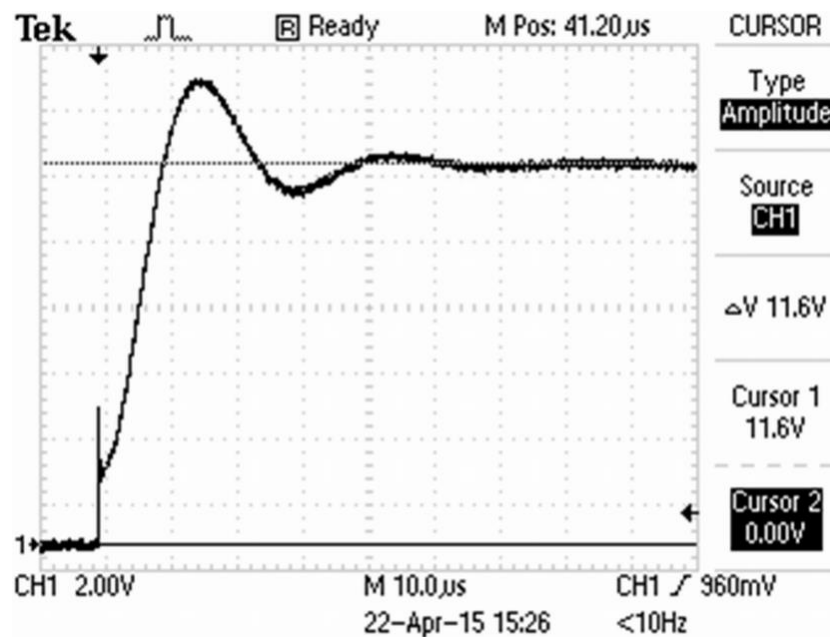
6. ábra: A laboratóriumi mérésekhez használt eszközök

Először egy 12 V-os DC tápegységgel tápláltam meg az áramkört. A bekapcsolási tranzienseket mértem az oszcilloszkóppal különböző nagyságú ellenállások soros közbeiktatása mellett. Azt tapasztaltam, hogy kis jelszintek esetén a bekapcsolási tranziens nagyon zajos és a  $\tau=RC$  képlet alapján kisebb ellenállások esetén kisebb felfutási idejű görbéket kaptam. A kondenzátor paramétereit a legjobban kis ellenállások soros közbeiktatása mellett lehet meghatározni, ezért csak a vezetékek és a csatlakozások ellenállására hagyatkozva is elvégeztem a bekapcsolási görbék felvételét.



7. ábra: Bekapcsolási tranziensek különböző ellenállások soros közbeiktatásával

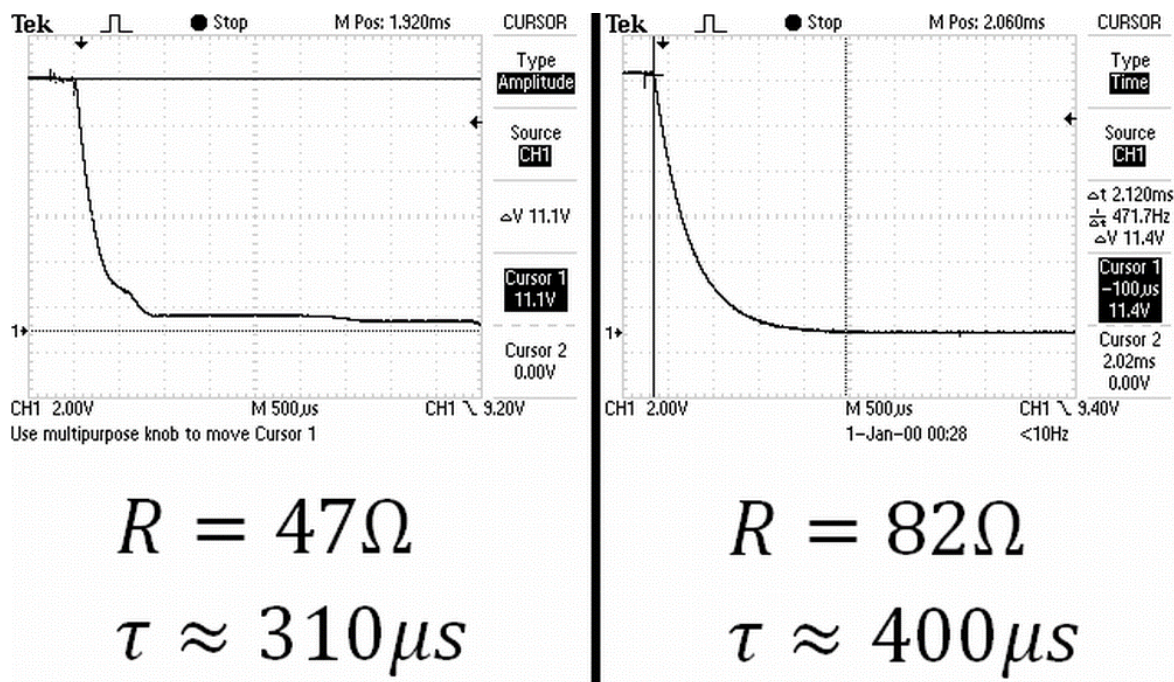
A 7. ábrán jól látható, hogy minél kisebb a beiktatott ellenállás, annál zajosabb a jel is. Az ellenállás közbeiktatása nélküli bekapcsolási tranziens a 8. ábrán látható.



8. ábra: Bekapcsolási tranziens ellenállás közbeiktatása nélkül

Az ábrából jól látszik az L-C rezgőkör jelleg, melynek az induktív összetevője a mérővezetékek által alkotott hurkok induktivitásából adódik. A bekapcsolási méréseknél zavaró körülményként jelentkezett a tápegység belső ellenállása. Kis jelszintek esetén (ilyenek számított a 12 V és ezért tértem át később 60 V-ra) a hálózati 50 Hz is kimérhető volt a töltetlen kondenzátor fegyverzetei között. Az előbb említett körülmények miatt megpróbáltam a kikapcsolási méréseket is elvégezni, hiszen elvileg kis ellenállásértékek mellett ezekből is ugyanúgy lehet következtetni a veszteségi paraméterekre.

A 9. ábrán látható kikapcsolási görbékről is leolvasható az időállandó. A mérőkör eredő ellenállása tartalmazza a kondenzátor kivezetéseinek ellenállását és a vezetékek soros veszteségét is a körbe kapcsolt ellenálláson kívül.

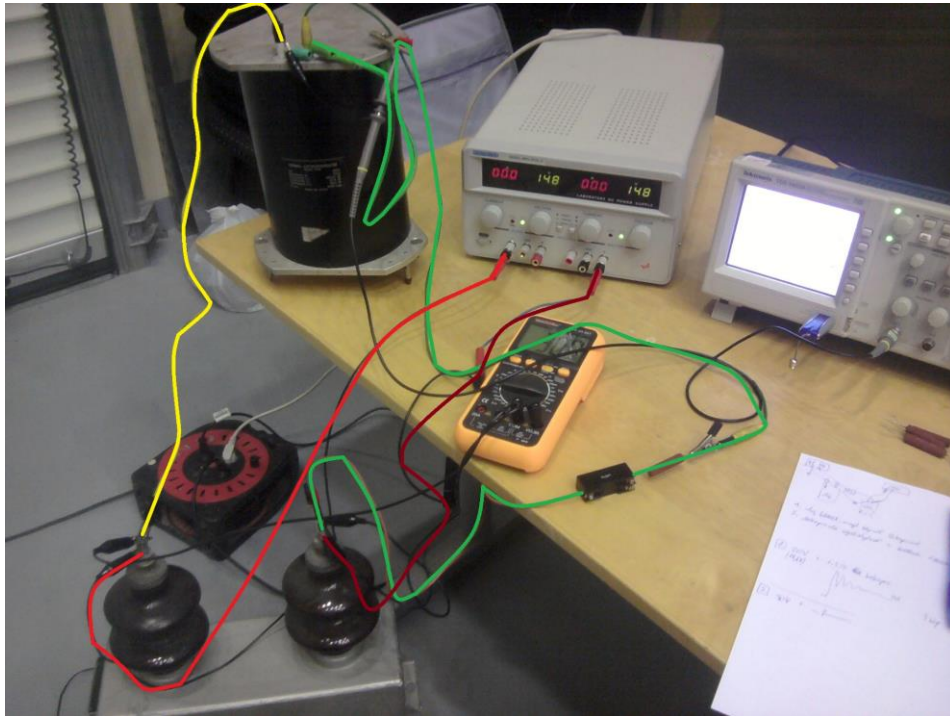


9. ábra: Kikapcsolási tranziensek

A be- és kikapcsolási mérések után áttöltési méréseket végeztem. Ehhez egy szén-dioxid szigetelésű kondenzátort használtam, amely a tulajdonságai alapján megfelelő a tápegységből adódó zavarok elkerülésére. A mért frekvenciatartományban a szén-dioxid szigetelésű kondenzátor gyakorlatilag veszteségmentes, frekvenciafüggetlen, ezen kívül a kapacitása akkora, hogy a mérési eredményeket nem befolyásolja. A mérést úgy végeztem, hogy az olaj-papír szigetelésű kondenzátort töltöttem 20, illetve 60 V-tal, majd a tápegységről leválasztva a két kondenzátort összekapcsoltam és oszcilloszkóppal mértem a szén-dioxid szigetelésű kondenzátor kapcsain lejátszódó bekapcsolási folyamatot.

Kétféle mérési elrendezést vizsgáltam, az elsőben a mérőkör induktivitása nagy volt a vezetékek hosszúsága és rendezetlensége miatt.



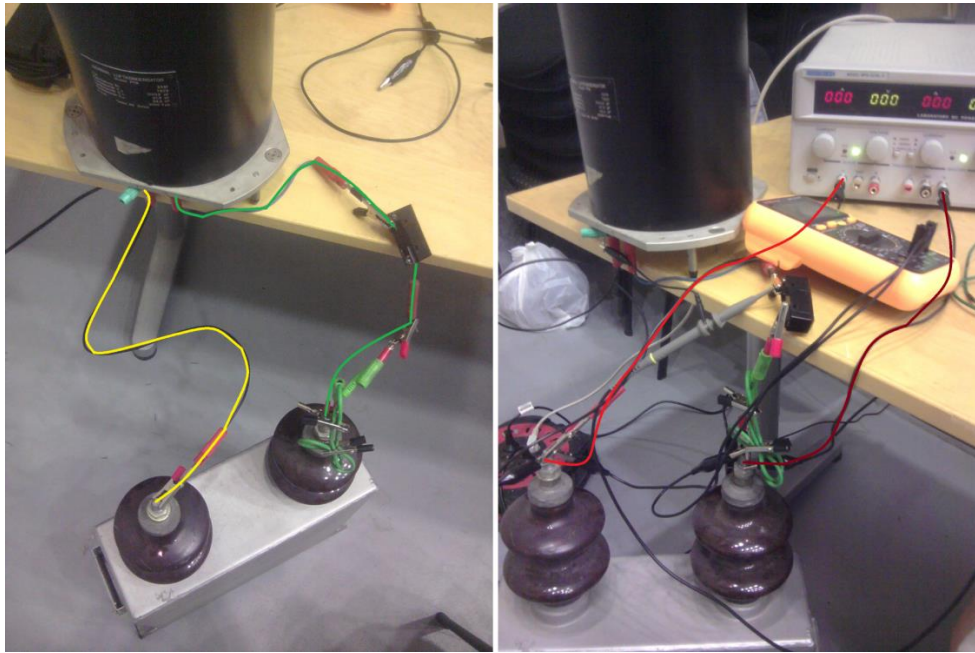


**10. ábra: Nagy induktivitású mérőkör**

A 10. ábrán látható vezetékezés:

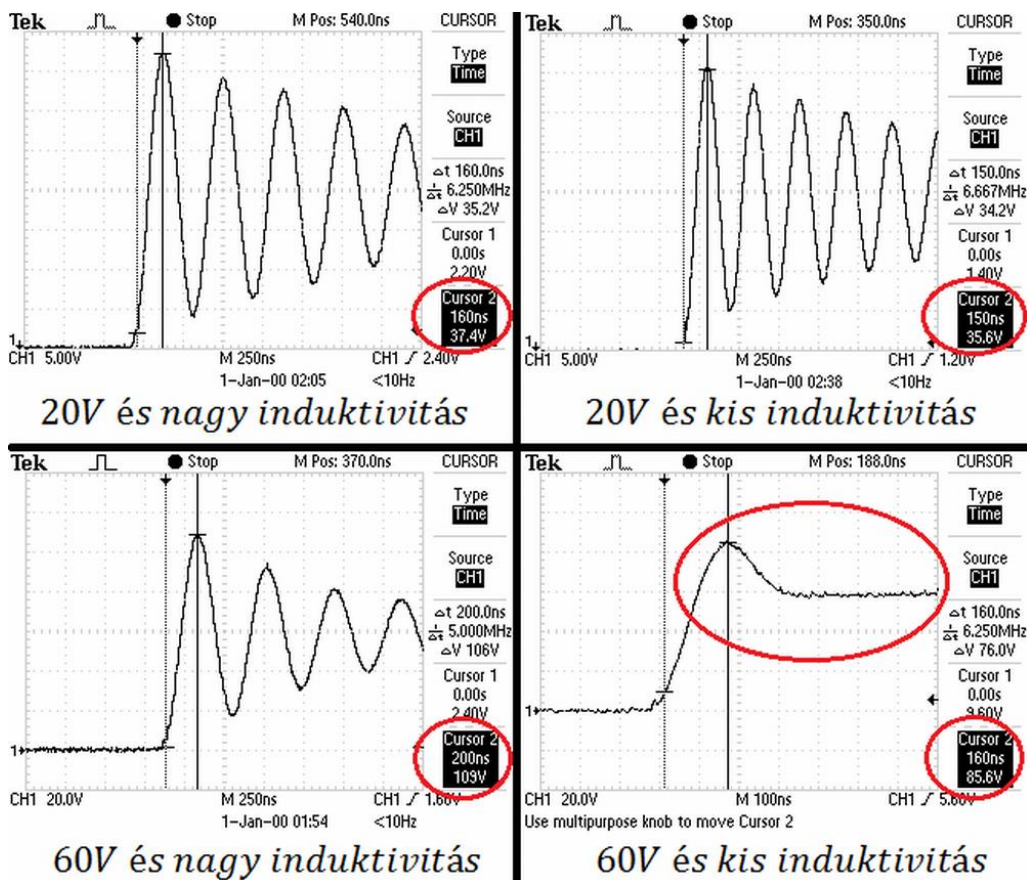
- Pirossal és barnával a DC táp bekötése
- Sárgával a két kondenzátort összekötő vezetékek
- Zölddel egy összekötő vezetéket láthatunk, melyet a mikrokapcsoló segítségével kapcsolunk be, elindítva ezzel az áttöltési folyamatot.

Második esetben kontrollált mérési körülmények szerint dolgoztam, ami azt jelenti, hogy minimalizáltam a vezetékek hosszát, párhuzamosan tartottam őket az áttöltés során, így könnyen számolható volt a mérőkör induktivitása. A 11. ábrán látható, hogy az előzőeknél sokkal rövidebb vezetékeket használtam, ezzel minimálisra csökkentve a hurkokat, melyek zavaró induktivitásként jelentkeztek a mérés során. A bal oldali ábrán a két kondenzátor összekötése látható rövid vezetékekkel, jobb oldalon pedig már a tápegység és a mérőműszerek is be vannak kötve.



11. ábra: Kis inductivitású mérőkör

A 12. ábrán látható mérési eredményekből jól látszik a nagy és a kis inductivitású mérőkör közötti különbség. 20 V-os töltőfeszültség esetén mindkét mérőkörben látható a jelentős rezgőkör-jelleg, illetve szembevetően, hogy a töltőfeszültséghez képest a válaszjelnek jelentős túllövése van.



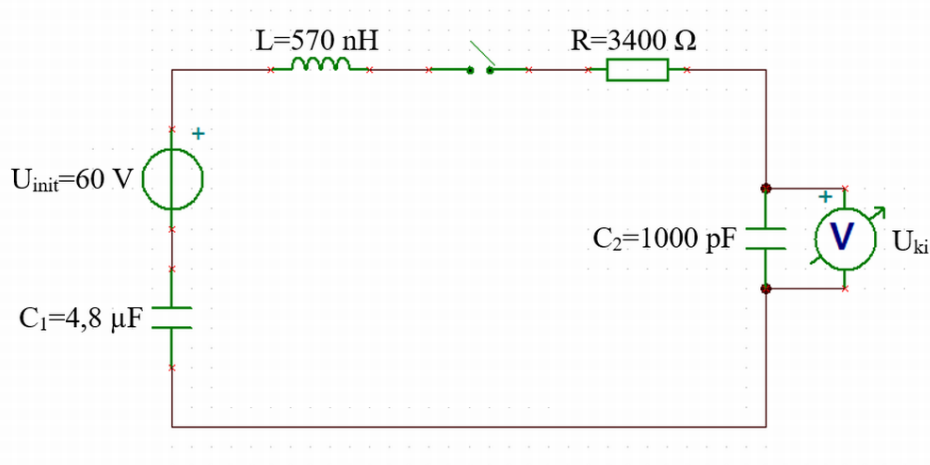
12. ábra: Áttöltési mérések eredményei

60 V-os töltőfeszültség hatására a nagy induktivitású körben a feszültségmaximum 109 V volt. Kis induktivitású körben ez lecsökkent 85,6 V-ra és a rezgés jelleg is hamar eltűnt. A másik fontos észrevétel, hogy kis hurkok esetén a 60 V-os töltés tranziensében gyakorlatilag a túllövés után a rendszer beáll a végleges állapotába és nem jön elő a csillapodó lengés jelleg. A jobb alsó ábrán látható, hogy a jel felfutása 100 ns-os nagyságrendbe esik. Ha ezt további ellenállások soros beiktatásával sikerül kitolni  $\mu\text{s}$ -os nagyságrendbe, akkor a görbénk már hasonlítani fog egy szabványos feszültségimpulzus homlokszakaszára.

A kontrollált mérési körülményekből adódik, hogy a vezetékek geometriájából adódó induktivitást ismerjük, így a későbbiekben tudunk számolni ezzel a zavaró hatással. Mivel a párhuzamos vezetékek hossza, a közöttük lévő távolság, az anyaguk és a keresztmetszetük ismert, ezért a [9] forrást felhasználva kiszámolható a mérőkör induktivitása, amelyre 570 nH adódott.

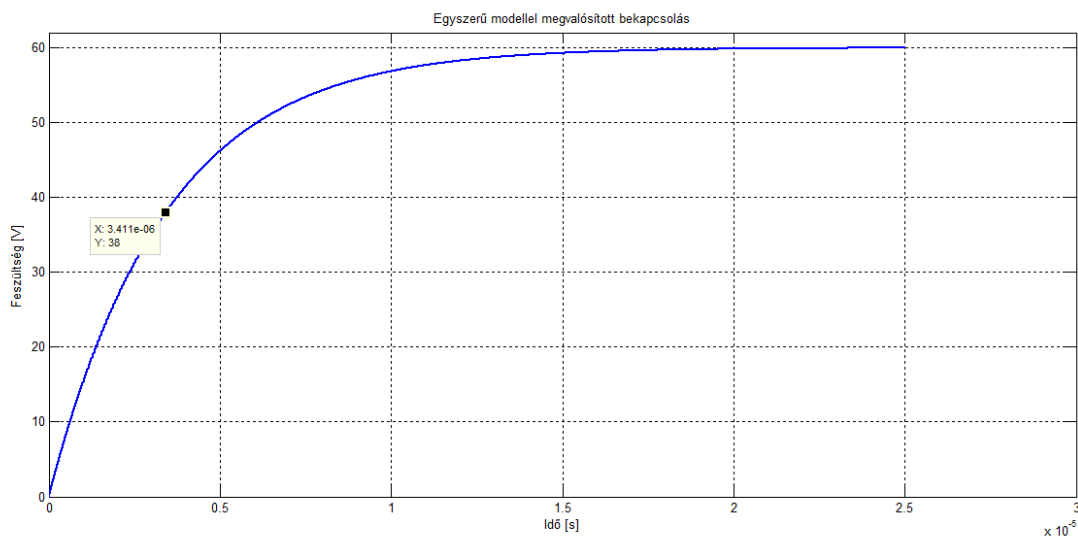
### 3 Szimuláció Matlab segítségével

A szén-dioxid szigetelésű kondenzátoron mért feszültségválaszok alapján Matlab szimulációk segítségével megpróbáltam kitalálni az olaj-papír szigetelésű kondenzátor valóságos modelljét. Úgy alakítottam a Matlab-ba bevitt s-tartománybeli modellt, hogy a szimuláció eredményeképpen kapott válaszjel ( $U_{ki}$ ) a lehető legjobban hasonlítson a mérési eredményekre. Először egy egyszerű villamos modellel dolgoztam (13. ábra), melyben az olaj-papír szigetelésű kondenzátor  $C_1$  kapacitásként, a szén-dioxid szigetelésű kondenzátor  $C_2$ -ként, a mérőkör inuktivitása  $L$ -ként, a soros ellenállás  $R$ -ként és az olaj-papír szigetelésű kondenzátor kezdeti feltétele  $U_{init}$ -ként jelenik meg.



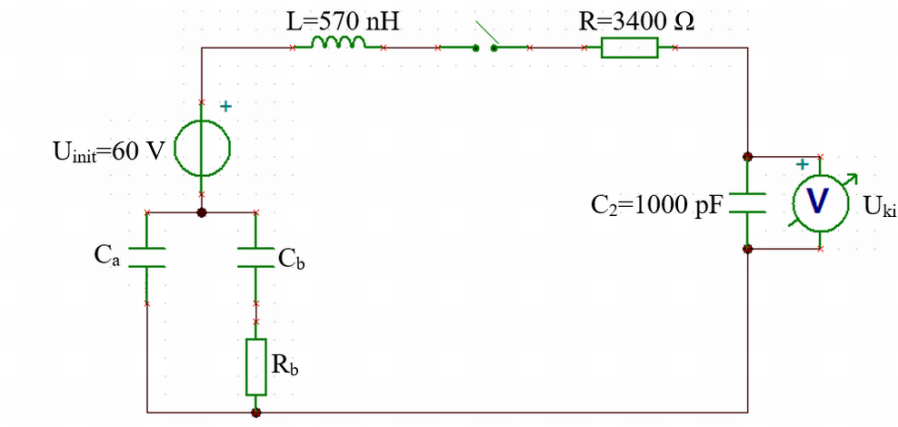
13. ábra: Matlab szimulációs modell egyszerűbb esete

Kiszámoltam az átviteli függvényt s tartományban, majd a Matlabba bevittem ezt a modellt. Végül részlettörtekre bontás után inverz Laplace transzformációval visszatértem időtartományra és egy idővektor definiálásával kirajzoltattam a feszültségválaszt.



14. ábra: Feszültségválasz egyszerű kapcsolás esetén

A válaszjel nagyságrendileg megegyezett a mért jellel. A mérési eredményekből az oszcilloszkóp ábrája alapján  $3400\ \Omega$ -os ellenálláson időállandóra kb.  $2\ \mu\text{s}$  jött ki, míg a szimuláció eredménye kb.  $3,4\ \mu\text{s}$ -ot adott. Az eredményekből látszik, hogy további pontosítások szükségesek és ezt az olaj-papír szigetelésű kondenzátor modellének bonyolításával érhetjük el.



**15. ábra: Pontosított modell az olaj-papír szigetelésű kondenzátorra**

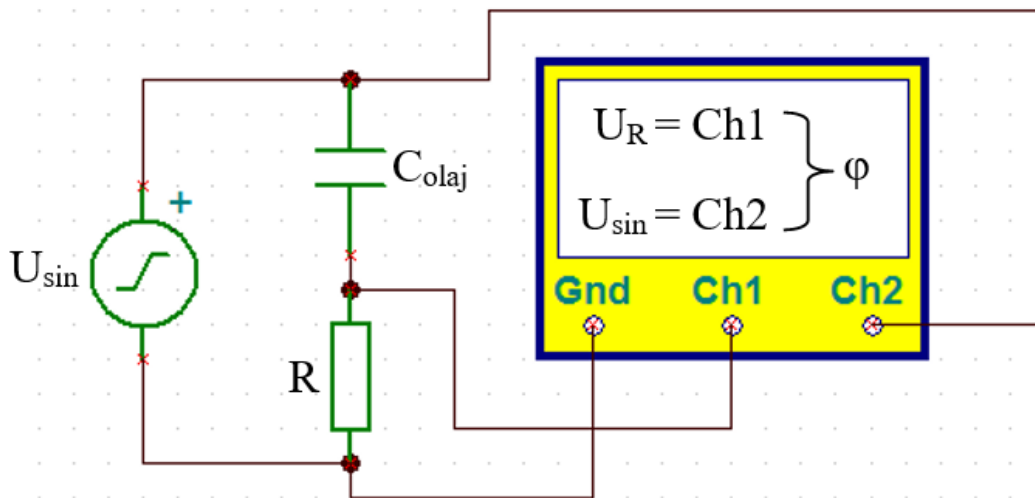
A programot úgy írtam meg, hogy az értékek ( $C_a$ ,  $C_b$ ,  $R_b$ ), így a párhuzamos ágak kapacitásaránya könnyen változtatható legyen. A bonyolultabb hálózat (15. ábra) szimulációja során a Matlab szoftver nem szolgáltatva a várt eredményeket. A modell pontosítást követően a későbbiekben mindenképpen szeretnék tovább haladni az időtartománybeli szimulációkkal is és ezzel a módszerrel is szeretném meghatározni a kondenzátor modelljét.

A kikapcsolási méréseket is szimuláltam, ezek az eredmények is egyezést mutattak a valós görbékkel.



## 4 Mérések frekvenciatartományban

A 2-es és 3-as fejezetben említett módszerrel felállított villamos modellt más módon is meg lehet határozni. Az olaj-papír szigetelésű kondenzátort egy frekvenciafüggetlen ellenállással sorosan kapcsolva rákötjük egy függvénygenerátorra. Ha sok frekvencián megmérjük a soros R-C tagot és feljegyezzük a generátor feszültségét, az ellenálláson eső feszültséget, illetve a két feszültség közötti fázisszöget, akkor ezekből az adatokból meghatározható a villamos modell.



**16. ábra: A frekvenciatartománybeli mérési elrendezés**

Egy adott frekvencián mérve egy soros vagy párhuzamos R-C modellel helyettesíthetjük a hálózatot, melyre jellemző az adott frekvencián mért két feszültség és a köztük lévő fázisszög. Az ennél kisebb frekvencián jellemző polarizációkat tartalmazza az aktuális modell, a lassabban kialakulókat azonban nem. Így különböző frekvenciákra felállított R-C modellek különböző számú polarizációt tartalmaznak. Ezeknek a modelleknek a felhasználásával fel lehet rajzolni a  $\tan\delta$  vagy az  $\epsilon'/\epsilon''$  frekvenciafüggését. Így ismertté válnak a végbemenő polarizációs folyamatok, tehát meghatározható a valóságos villamos modell.



**17. ábra: A frekvenciatartománybeli mérésekhez használt eszközök**

A méréshez használt eszközök a 17. ábrán láthatóak:

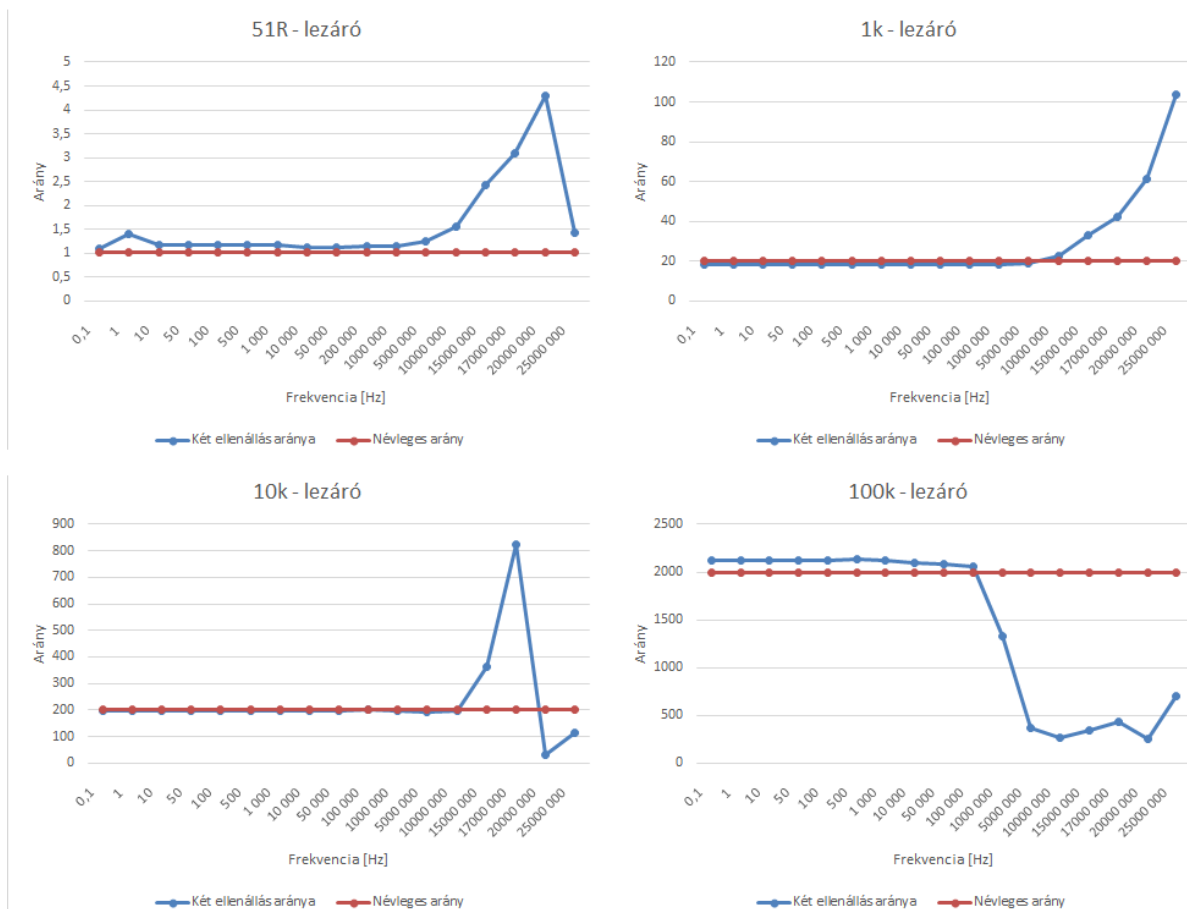
- VEB Isokond 4,8  $\mu\text{F}$  kapacitású olaj-papír szigetelésű kondenzátor
- Tektronix AFG1022 25 MHz sávzélességű jelgenerátor
- Agilent négycsatornás digitális oszcilloszkóp
- 50 Ohm-os frekvenciafüggetlen lezáró ellenállás, BNC T elosztó
- Rétegellenállások validáció céljából



**18. ábra: A validációs mérések mérési elrendezései**

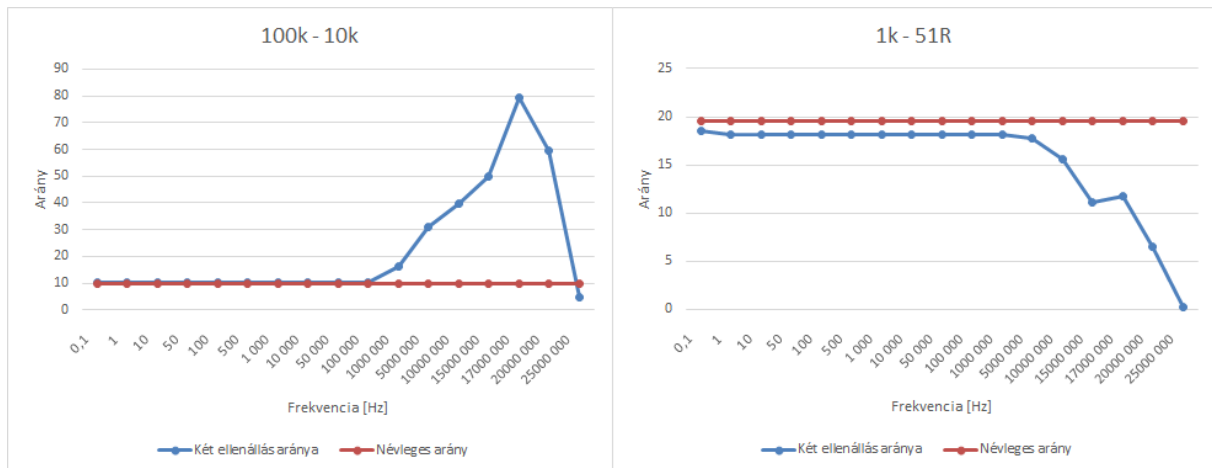
Először a kondenzátorral sorosan kapcsolt 50  $\Omega$ -os lezáró ellenállást validáltam rétegellenállások segítségével. Különböző nagyságú rétegellenállásokat sorba kötve a lezáró ellenállással megvizsgáltam a köztük lévő fázisszöveget széles frekvenciatartományban. A kapott adatokból felrajzolt diagramok alapján következtettem azokra a frekvenciatartományokra, amelyeken belül az ellenállások még frekvenciafüggetlennek tekinthetők.

A vizsgált frekvenciatartomány 0,1 Hz-től 25 MHz-ig terjedt. A rétegellenállások 51, 1k, 10k, 100k névleges értékkel rendelkeztek.



**19. ábra: Lezáró ellenállás validációs mérései 1.**

A 19. ábrán látható grafikonok a rétegellenállások és az 50  $\Omega$ -os, méréshez használt lezáró ellenállás névleges arányait ábrázolják pirossal, valamint késsel a validációs mérések eredményei láthatók. Például a 10 k $\Omega$ -os rétegellenállással történő validáció eredményeiből látszik, hogy legalább az egyik ellenállás 15 MHz-nél nagyobb frekvenciákon elveszíti frekvenciafüggetlenségét. Mivel az eredményekből nem lehet egyértelműen eldönteni, hogy melyik ellenállás vált frekvenciafüggővé, ezért végeztem méréseket ennek kiderítésére is. Ekkor a különböző rétegellenállások soros kapcsolását vizsgáltam ugyanebben a frekvenciatartományban. Az eredmények a 20. ábrán láthatóak.



**20. ábra: Lezáró ellenállás validációs mérései 2.**

A 19. és a 20. ábrát összevetve látszik, hogy például a 20. ábra jobb oldali grafikonján látható 1 k $\Omega$ -os és 51  $\Omega$ -os rétegellenállások körülbelül ugyanazon a frekvencián veszítik el egymáshoz képest frekvenciafüggetlenségüket, mint külön-külön a lezáró ellenálláshoz képest. Ebből arra következtettem, hogy a frekvenciafüggőség oka a rétegellenállásokban keresendő. Így az 50  $\Omega$ -os lezáró ellenállás – amit a kondenzátor paramétereinek meghatározásához használtam a vizsgált frekvenciatartományban – frekvenciafüggetlennek tekinthető.



**21. ábra: A kondenzátor és az ellenállás soros kapcsolása, illetve a mérési elrendezés**

A mérés összeállításakor a lehető legrövidebb összekötő vezetékeket használtam. A mérendő feszültségeket már közvetlenül a mérési ponttól árnyékolt koax kábel segítségével továbbítottam az oszcilloszkóp felé, így a mért feszültségek nem lettek környezeti zajjal terheltek. A 21. ábra bal oldali képén látható, hogy a lezáró ellenállást egy BNC T-dugón keresztül csatlakoztattam sorba a kondenzátorral, így a T-dugó szabadon lévő csatlakozójáról vehettem le az ellenálláson lévő feszültséget.

A mérések során körülbelül 230 frekvencián vizsgáltam meg a 16. ábrán ismertetett adatokat. Ezeket Excel segítségével dolgoztam fel. Az oszcilloszkópon megjelenített feszültségekről a Quick Measure

funkció segítségével olvastam le az adatokat. Ez hibákat eredményezett, így a jövőben az újramérés során kimentett .bin kiterjesztésű fájlok alapján fogom az adatfeldolgozást elvégezni Matlab segítségével. Így sokkal pontosabb adatokat kaphatok, mivel az oszcilloszkóp mintavételezett és eltárolt adataiból számolhatom ki a nullátmeneteket és a feszültségmaximumokat.

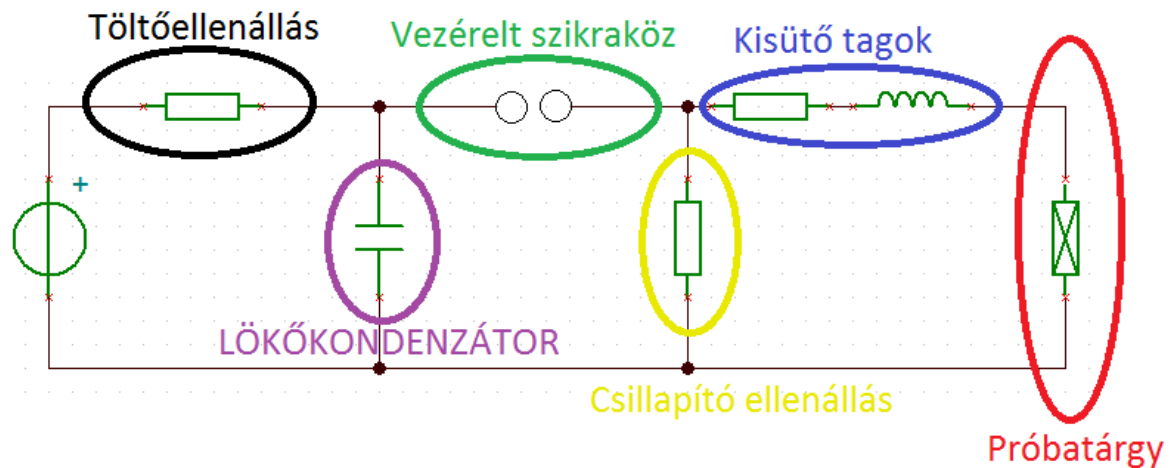
A feszültségekből és a fázisviszonyaikból kiszámolom minden frekvenciára egy soros R-C helyettesítő kép C tagját. Az R tag a lezáró  $50 \Omega$ -os ellenállás frekvenciafüggetlensége miatt minden frekvencián  $50 \Omega$  az általam vizsgált tartományban. Az eddig mért adatokból látszik, hogy 20 kHz környékén a soros mérési elrendezés eredő feszültsége már siet az ellenállás feszültségéhez képest. Ez az Excel táblázatban negatív szögként jelenik meg, ami azt bizonyítja, hogy a jelenleg feltételezett modellből hiányzik egy induktív paraméter. A valóságban az induktivitás a mérési elrendezés változatlansága miatt frekvenciafüggetlen, ezért az egyre növekvő induktív jelleget a csökkenő kapacitív jelleg jelenti. Ez azért van, mert feltételezéseim szerint a kapcsolásban egy frekvenciafüggő kapacitás van, melynek nagysága a frekvencia növekedésével egyre csökken. Az eredetileg tervezett egyszerűsítés a jelen mérési módszerrel ezen a modellen az induktivitás ismeretének hiányában nem határozható meg.

A következő lépésben egy impedancia-analizátorral pontosan megmérem a kondenzátor paramétereit. A frekvenciatartománybeli mérést azért végeztem el kis feszültségen, mert előkészítő mérésnek szánom a nagyfeszültségű mérések előtt. Az áramlököben való alkalmazáshoz ugyanis szükség van a nagyfeszültségen történő mérési eredményekre is, melyek segítségével a nemlinearitásokra fény derülhet.

A mérésekkel az áramlökö berendezés lökökondenzátorának modelljét fogom meghatározni. Jelenleg azért csak a lökökondenzátor modellezésével foglalkozom, mert ez a legkritikusabb része a berendezésnek. A hozzávezetések induktivitásai számolhatók, a próbatárgy kapacitása pedig adott. Így mindezek ismeretében adott kimeneti hullámalakra meg tudom határozni a lökökondenzátorok eredőjének nagyságát (5. fejezet 23. ábra), melyekből a hullám homlok- és félértékideje következik illetve a töltőfeszültség nagyságát, mellyel a hullám csúcsértéke befolyásolható.

## 5 Áramlökő modellezése

### 5.1 Az áramlökő felépítése és működése

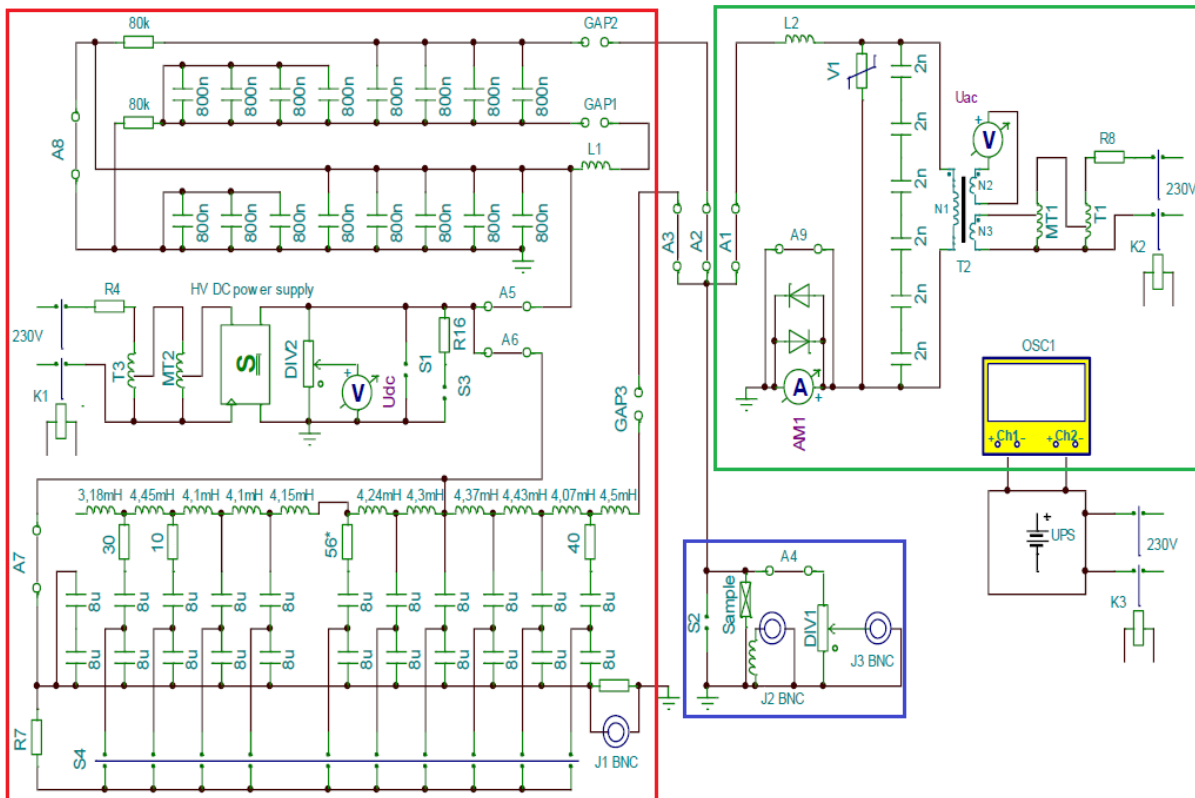


**22. ábra: Egy áramlökő egyszerűsített blokkvázlata**

Egy áramlökő berendezés leegyszerűsítve úgy működik, hogy a bemeneti feszültség a töltőellenálláson keresztül tölti a lökőkondenzátort. Ha a vezérelt szikraköz eléri az átütés határát, akkor egy gyújtószikra hatására a szikraköz átüt, így a lökőkondenzátor hirtelen rákapcsolódik a mögöttes hálózatra. A kisütő tagok hatására azok időállandóitól függően kialakul egy hullámalak a próbatárgyon. A laboratóriumi mérések során a próbatárgy impedanciája ismert, a hozzávezetések zavaró hatása meghatározható. Munkám során a lökőkondenzátor modelljét határozom meg majd a jövőben, így minden áramköri elem ismert lesz és a lökőkondenzátor-hálózat, a kisütő tagok és a töltőfeszültség variálásával meg lehet határozni bizonyos kereteken belül bármilyen jelalakot.

Meghatározható egy időállandó az L-C elemekből. A lökőhullám csúcsértékének időpillanata megegyezik az időállandóval, a homlokidő az időállandó 0,7126-szorosával, a félértékidő pedig a 2,6784-szeresével. A csúcsérték a töltőfeszültség és a kisütő ellenállás függvénye.





**23. ábra: A Nagyfeszültségű Laboratórium áramlökő berendezésének felépítése**

A Nagyfeszültségű Laboratóriumban található áramlökő berendezés működését a [8] forrás alapján dolgoztam fel.

Az áramlökő berendezést többféle célra használják a BME Nagyfeszültségű Laboratóriumban:

- Referenciafeszültség mérésére
- Maradékfeszültség mérésére: 8/20  $\mu$ s lökőhullám vezetésekor mérhető feszültség
- Üzemi igénybevétel: névleges üzemi feszültség 1,2-szeresére szuperponált lökőimpulzusok rákapcsolása a mérendő eszközre
- Hosszúhullám-állóság: különböző ideig tartó szabványos nagyságú impulzusok kapcsolása a mérendő eszközre

A 23. ábrán késsel bekeretezve látható a minta (Sample) áramkörbe kapcsolódása. A mintát az S2 szakaszoló zárja rövidre, ha éppen nincsen mérés. Az A4 átkötésen keresztül a mintán lévő feszültséget és áramot mérhetjük meg. A DIV1 1:1000-es arányú feszültségosztón keresztül a J3 csatlakozón a minta feszültsége, az áramváltón keresztül J2-es csatlakozón a mintán átfolyó áram jelalakja jeleníthető meg oszcilloszkóp segítségével. A felsorolásban említett mérésekhez szükséges próbafeszültséget a mintára az A1, A2, A3 átkötéseken keresztül juttatjuk el. Egyszerre ezek közül csak egy darab lehet bekötve, kivéve az üzemi mérés esetén, amelynél A1 és A2 átkötések egyidejűleg aktívak.

Az üzemi igénybevétel teszteléséhez szükséges áramhullámot a zöld színnel bekeretezett rész állítja elő. Az üzemi feszültséget a T2 feszültségváltó állítja elő, melynek primer feszültségét egy kézi

szabályozású T1 és egy motoros szabályozású MT1 toroiddal állíthatjuk be. A primer áram korlátozására R8 van beiktatva az áramkörbe. A feszültségváltót az L2 tekercs, a kondenzátorok és a V1 túlfeszültség-levezető védi a lökőhullámtól. A földágban folyó áramot is mérhetjük az A9 átkötés bekapcsolásával, ekkor a multimétert ellenpárhuzamosan kapcsolt diódák védik. K2 mágneskapcsolóval kapcsolható be a kapcsolásrészlet hálózati tápellátása. T2 szekunder feszültségét Uac feszültségmérő segítségével ellenőrizhetjük.

A pirossal bekeretezett részen látható a 8/20  $\mu$ s szabványos lökőhullám és a hosszúhullám-állóság vizsgálatokhoz szükséges áramkör. Ezeknek előállításához az egyenfeszültségű HV DC jelölésű forrásra van szükség, melynek bemenetét T3 kézi működtetésű és MT2 motoros szabályozású toroidok segítségével állíthatjuk be. Az egyenfeszültséget DIV2 feszültségosztón keresztül Udc multiméterrel ellenőrizhetjük. R4 szerepe az áramkorlátozás. A5 és A6 közül egyszerre csak egy lehet aktív. Ha A5 átkötés van bekapcsolva, akkor a kapcsolásrészlet 800 nF-os kondenzátoraiból álló lökőkondenzátor-hálózat alakítja ki a 8/20  $\mu$ s-os hullámalakot. A használaton kívüli kondenzátorokból, illetve L1 hangolásával ettől eltérő hullámalakokat is létrehozhatunk. A célkitűzés szempontjából ez fontos, mivel ezeknek a hálózati elemeknek a segítségével tudjuk változtatni a kívánt hullámalak paramétereit. Az A2 átkötésen keresztül jut az áramhullám a mintára. Ha A6 átkötés van bekapcsolva, akkor az alsó, hosszúhullámú rész kap egyenáramú táplálást és az A3 átkötésen keresztül jut a vizsgálóhullám a mintára. GAP1, GAP2, GAP3 szikraközök mindig úgy vannak beállítva, hogy a meghatározott feszültség szinten még éppen ne üssenek át, majd efelett az átütést követően jut el az áramhullám az átkötéseken keresztül a vizsgálandó tárgyra. A toroidok bemenetét K1 mágneskapcsoló segítségével csatolhatjuk a hálózatra.

A mérésre éppen nem használt áramkörrészeket földelni kell, ez az S jelölésű pneumatikus szakaszolókkal történik.



## 6 Összegzés

---

Az irodalomkutatás során megismert fizikai folyamatokat az áramlökő berendezés lökőkondenzátorának valós mérései során figyelembe vettem. A folyamatok a valós működés szempontjából fontosak, így egy valóságos modellt tudok meghatározni a kondenzátorra.

Először időtartományban vizsgáltam a kondenzátor viselkedését és a valós mérési eredményeket szimulált eredményekkel összevetve következtettem a kondenzátor valós helyettesítő képére. A vizsgálatokhoz bekapcsolási, kikapcsolási illetve áttöltési méréseket végeztem. Ezután frekvenciatartományban végeztem méréseket. Először a méréshez használt eszközök frekvenciafüggetlenségét vizsgáltam, a rétegellenállásokat és a lezáró ellenállást validáltam. Soros lökőkondenzátor – lezáró ellenállás kapcsolás során sok különböző frekvencián feszültség és fáziskülönbség adatok alapján frekvenciánként soros R-C modelleket határoztam meg.

Az időtartománybeli méréseknél a szimuláció során nem tudtam nagyon pontos, több párhuzamos ágból álló helyettesítő képet meghatározni, mert a szimulációhoz használt szoftver nem szolgáltatta a várható eredményeket.

A frekvenciatartománybeli mérések során a feltételezett modellbe nem számoltam bele a hozzávezetések és a kondenzátor jelentős induktív hatását, ezért a jövőben egy másik mérési módszerrel, illetve nagyobb feszültségen fogom elvégezni a méréseket.

# Irodalomjegyzék

---

- [1] Németh E., Horváth T.: Nagyfeszültségű szigetelés technika. Tankönyvkiadó, Budapest, 1990.
- [2] Dr. Horváth T., Dr. Csernátony Hoffer A.: Nagyfeszültségű technika. Tankönyvkiadó, Budapest, 1986.
- [3] Kuffel, E., Zaengl, W. S., Kuffel, J.: High Voltage Engineering Fundamentals. Butterworth-Heinemann, Great Britain, 2000.
- [4] Holtzhausen, Dr. JP, Vosloo, Dr. WL: High Voltage Engineering Practice and Theory
- [5] Luspay Ö.: Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata. Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete, Budapest, 2000.
- [6] BME VIK Villamos kapcsolókészülékek (BMEVIVEA336) előadásdiák
- [7] BME VIK Váltakozó áramú rendszerek II. (VIVEM111) előadásdiák
- [8] Dr. Kiss István: BME-VIK-VET-NFCS-MŰSZ-001 sz. Minőségügyi munkautasítás 1.11. sz. kapcsolódó dokumentuma – Nagyfeszültségű áramlökő berendezés kezelési utasítása, pp1-11, 2011
- [9] Hudson, Nelson: Útban a modern fizikához 32. fejezet, 1994.

# Ábrajegyzék

---

1. ábra: Tértöltés-polarizáció .....	5
2. ábra: A komplex permittivitás, D, E és P összefüggése .....	6
3. ábra: A permittivitás és a $\tan\delta$ frekvenciafüggése .....	7
4. ábra: A permittivitás és $\tan\delta$ változása széles frekvenciatartományban .....	7
5. ábra: A szigetelések valós helyettesítő kapcsolása .....	8
6. ábra: A laboratóriumi mérésekhez használt eszközök .....	9
7. ábra: Bekapcsolási tranziensek különböző ellenállások soros közbeiktatásával .....	10
8. ábra: Bekapcsolási tranziens ellenállás közbeiktatása nélkül .....	10
9. ábra: Kikapcsolási tranziensek.....	11
10. ábra: Nagy induktivitású mérőkör .....	12
11. ábra: Kis induktivitású mérőkör .....	13
12. ábra: Áttöltési mérések eredményei.....	13
13. ábra: Matlab szimulációs modell egyszerűbb esete.....	15
14. ábra: Feszültségválasz egyszerű kapcsolat esetén.....	15
15. ábra: Pontosított modell az olaj-papír szigetelésű kondenzátorra .....	16
16. ábra: A frekvenciatartománybeli mérési elrendezés .....	17
17. ábra: A frekvenciatartománybeli mérésekhez használt eszközök.....	18
18. ábra: A validációs mérések mérési elrendezései.....	18
19. ábra: Lezáró ellenállás validációs mérései 1.....	19
20. ábra: Lezáró ellenállás validációs mérései 2.....	20
21. ábra: A kondenzátor és az ellenállás soros kapcsolása, illetve a mérési elrendezés .....	20
22. ábra: Egy áramlökő egyszerűsített blokkvázlata .....	22
23. ábra: A Nagyfeszültségű Laboratórium áramlökő berendezésének felépítése .....	23