



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

Bangó Zsófia Lilla

**ELEKTROMOS AUTÓKNÁL ALKALMAZOTT  
SZIGETELŐPAPÍROK SZIGETELÉSI KÉPESSÉGÉNEK  
VIZSGÁLATA**

TDK dolgozat

KONZULENSEK

Dr. Cselkó Richárd

Székely László

BUDAPEST, 2023

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>1 Bevezető</b>	<b>5</b>
<b>2 Elektromos motorok típusai</b>	<b>6</b>
<b>3 Motorok szigetelése</b>	<b>8</b>
3.1 Szigetelésekre vonatkozó kritériumok	8
3.2 Szigetelőanyagok	9
<b>4 Szigetelőpapírok vizsgálata</b>	<b>10</b>
<b>5 Átütési vizsgálatok</b>	<b>12</b>
5.1 Átütési feszültség	12
5.2 Szabványos elrendezés	13
5.3 AC mérések	17
5.4 Egyenirányított AC-val végzett mérések	19
5.5 DC mérések	22
<b>6 Olaj-papír szigetelés</b>	<b>24</b>
<b>7 Szigetelések öregedése és degradációja</b>	<b>26</b>
7.1 Szigetelőpapírok öregítése	26
7.2 Öregített mintákon végzett mérések	29
<b>9 További mérések</b>	<b>32</b>
<b>10 Összefoglalás</b>	<b>33</b>
<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>34</b>
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>35</b>

# Összefoglaló

A jövő autójával szemben számos elvárás áll fenn: megbízható, alacsony szén-dioxid kibocsátású, megfizethető árú elektromos autókat keresünk, minél nagyobb teljesítménnyel. A nagyobb teljesítmény eléréséhez nagyobb feszültség szintre van szükség, ezzel együtt pedig újabb technológiai kihívások jelennek meg. Kulcsfontosságú kérdés ezeknek a járműveknek a szigetelési rendszere, hiszen az elektromos motorokban a feszültség szint ma már a 800 V-ot is elérheti, 150-200 °C-os hőmérséklet mellett. A nagy feszültség szint és a magas hőmérséklet mind veszélyt jelentenek a szigetelésre, melyek a jármű meghibásodásához vezethetnek, bizonyos esetekben pedig biztonsági kockázatot is jelentenek.

A kutatásom célja, hogy különböző szigetelőpapírok paramétereit vizsgálva és összehasonlítva megtaláljam, hogy melyik a legalkalmasabb elektromos autók motorjának szigetelésére. Ehhez egyen, váltakozó, és lökőfeszültség-impulzus esetén mértem az egyes anyagok átütési feszültségét. A szigetelőpapírokat szárazon és különböző olajok alatt, hajlítás nélkül és különböző mértékű hajlítással (45, 90 és 180 fokban meghajlítva) is vizsgáltam, ezáltal pontos képet kapva arról, hogy milyen ellenállóképességgel rendelkeznek, és a gyártás során elkerülhetetlenül jelentkező mechanikai igénybevételek, valamint az olajjal való impregnálás hogyan befolyásolja tulajdonságaikat.

## **Abstract**

The car of the future has a number of requirements: we are looking for reliable, affordable electric cars with low CO<sub>2</sub> emission and as high performance as possible. To achieve higher performance, higher voltage levels are needed, and with that comes new technological challenges. A key issue is the insulation system for these vehicles, as electric motors can now reach voltages of up to 800 V at temperatures of 150-200 °C. High voltage levels and high temperatures are both hazards to the insulation, which can lead to vehicle failure and in some cases, can pose a safety risk.

The aim of my research is to find out which is the most suitable for insulating the motor of electric cars by testing and comparing the parameters of different insulating papers. To do this, I measured the breakdown voltage of each material for DC, AC and surge voltage pulses. I tested the insulating papers dry and also with different oils, without bending and with different degrees of bending (45, 90 and 180 degrees), to get an accurate picture of their performance and how the mechanical stresses that inevitably occur during production and oil impregnation affect their properties.

# 1 Bevezető

A fosszilis üzemanyagokon alapuló járművek a CO<sub>2</sub>-kibocsátás fő forrásának számítanak. A hagyományos belső égésű motorral hajtott járművekhez képest a hibrid és tisztán elektromos járművek bevezetése egy eszköz az üvegházhatású gázok csökkentése és a globális felmelegedés hatásainak megfékezése érdekében. [1]

Az elektromos jármű motorjának kiválasztása döntő lépés a teljes járműrendszer tervezésében. Számos kritériumot kell figyelembe venni, például a hatékonyságot, a költséget, a megbízhatóságot, a teljesítménysűrűséget, a technológia érettségét és a szabályozhatóságot. [2] Napjainkban a nagy hatásfok és a nagy teljesítmény is fontos szempontok. A teljesítmény optimalizálásának leghatékonyabb módja a feszültség szint növelése, az eddig megszokott 300-400 V-ról akár 800 V-ra. Ez a nagy teljesítményen kívül számos előnnyel jár a fogyasztó számára, mint például a gyorsabb töltés, kisebb tömeg és térfogat, azonban a motor villamos szigetelési rendszere számára nagy igénybevételt jelent. A feszültség 800 V-ra történő emelése veszélyes lehet a szigetelésre, mivel a kisfeszültségű motorokban vékony, gyengébb szigetelőanyagokat használnak. [3] Kutatásom célja annak értékelése, hogy a főként kisfeszültségű rendszerekben használt szigetelőpapírok hogyan bírják a nagyfeszültségű környezetet mind váltakozó, mind egyenfeszültség esetén.

## 2 Elektromos motorok típusai

Az ipari alkalmazásokban a hibrid és tisztán elektromos járművekben leggyakrabban használt motortípusokat az alábbi ábra mutatja, hibrid járművek típusain keresztül.

HEV Model	Propulsion System
 PSA Peugeot-Citroën/Berlingo (France)	Dc Motor
 Holden/ECOMmodore (Australia)	Switched Reluctance Motor
 Nissan/Tino (Japan)	Permanent Magnet Synchronous Motor
 Honda/Insight (Japan)	Permanent Magnet Synchronous Motor
 Toyota/Prius (Japan)	Permanent Magnet Synchronous Motor
 Renault/Kangoo (France)	Induction Motor
 Chevrolet/Silverado (USA)	Induction Motor
 DaimlerChrysler/Durango (Germany/USA)	Induction Motor
 BMW/X5 (Germany)	Induction Motor

1. ábra: Hibrid elektromos autók és a bennük alkalmazott motorok [4]

Az egyenáramú motorok főleg az 1900-as évek elején voltak elterjedtek a vontatási alkalmazásokban. Előnyük a könnyű fordulatszám-szabályozás, és hogy jól viselik a hirtelen terhelésnövekedést. Mindezek a jellemzők ideális vontatómotorokká teszik. A fő hátránya a kefék miatti magas karbantartási igény. Ezt a hátrányt kiküszöböli a kefe nélküli egyenáramú motorok (BLDC) használata, amelyeknél nincs kommutátor és kefe elrendezés. A BLDC-motorok ezáltal karbantartásmentesek, emellett nagy indítási nyomatékkal és hatásfokkal rendelkeznek. Ezek a legelőnyösebb motorok az EV alkalmazásokhoz. Két altípusuk van, az egyiknél a forgórész kívül van, az állórész pedig belül, míg a másikonál a forgórész van belül, az állórész pedig kívül, mint a hagyományos motoroknál. Ez külső erőátviteli rendszert igényel a teljesítménynek a tárcsákra történő átviteléhez. Az állandó mágneses szinkronmotorok (PMSM) hasonlóak a BLDC-hez, szintén nagy teljesítménysűrűséggel és hatékonysággal rendelkeznek. A PMSM a legjobb választás a nagy teljesítményű alkalmazásokhoz. Magas költségei ellenére a legtöbb autógyártó ezeket a motorokat használja hibrid és elektromos járművekhez. A kapcsolt reluktancia motorok egyszerű felépítésűek és robusztusak, ami alkalmassá teszi őket nagy sebességű alkalmazásra. Legnagyobb hátránya a bonyolultság, és zajproblémákkal is jár. Az indukciós motorok, például a háromfázisú váltakozó áramú indukciós motorok nem rendelkeznek nagy indítási nyomatékkal, mint az egyenáramú motorok, de hosszabb élettartamúak és nagyobb hatásfokkal rendelkeznek. Hátrányuk a bonyolult vezérlés, de ezzel szemben egy olcsó lehetőség, amely ellenáll a durva környezeti hatásoknak. Sok egyenáramú motort váltanak le ilyen típusú motorokkal. [5]

## 3 Motorok szigetelése

### 3.1 Szigetelésekre vonatkozó kritériumok

Az elektromos járművek szigetelésének számos követelménynek kell megfelelnie. Ha a szigetelés meghibásodik, az a gép meghibásodásához, bizonyos esetekben pedig biztonsági kockázathoz, balesethez vezethet. Az elektromos, mechanikai és termikus igénybevételek mind kockázatot jelentenek a szigetelésre. [6] Nagy terhelés hatására magas hőmérséklet keletkezik, a motor típusától függően ez elérheti a 100-200 °C-ot, ezért a szigetelés hőállósága kulcsfontosságú. [7] Az áramkörben fellépő zavarok túlfeszültségeket okoznak, a rezgések és a mechanikai igénybevételek pedig szintén károsítják a szigetelőanyagot és ezáltal a motort. A szigetelésnek a nedvesség és más környezeti hatások miatt korrózióállónak is kell lennie, és mivel az elektromos járművek motorjában szűk hely van, kompaktnak kell lennie. A növekvő verseny miatt egyre nagyobb szükség van a szigetelés méretének és súlyának csökkentésére. Fontos azonban figyelembe venni, hogy a károsodások az alkalmazott feszültségtől és az impulzusfrekvenciától függően változnak. Az öregedés a hőveszteségek és a dielektromos veszteségek eredménye, amelyek a frekvenciával nőnek. Magasabb frekvencián az öregedés gyorsabban következik be, alacsonyabb frekvencián pedig a részleges kisülések valószínűsége nő. [8] A szigetelőrendszereket befolyásoló tényezők általában négy fő csoportra oszthatók: termikus, elektromos, mechanikai és környezeti tényezők. A hajtómotorokat a nagy ismétlési frekvenciák és a gyors felfutási idejű impulzusok miatt mindezek a tényezők befolyásolják, gyakran egyszerre. [1]



## 3.2 Szigetelőanyagok

Attól függően, hogy pontosan milyen környezetben és célra alkalmazzuk a szigetelést, számos különböző szigetelőanyag létezik. A szigetelőanyagokat több szempont alapján is csoportosíthatjuk, például hőosztályokba vagy szigetelési osztályokba, de az anyagok alapján is léteznek kategóriák, például szerves vagy szervetlen szigetelőanyagok. A szerves anyagok közé tartoznak a szigetelőpapírok, a fából készült vagy fával kevert anyagok, a cellulóz vagy a pamut. Ezeket impregnálás nélkül és impregnálva is lehet alkalmazni – impregnálás történhet például olajjal vagy kétkomponensű műgyantával. A szervetlen anyagok közé tartoznak bizonyos textil alapú szigetelések, az üveg, a szilikon, a műanyag. [9] A szigetelőpapírok népszerű szigetelőanyagok, ugyanis a celullóznak köszönhetően jó elektromos tulajdonságokkal rendelkeznek, valamint az olcsóbb szigetelőanyagok közé tartoznak. A szigetelőpapírok általában szerves anyagok, de létezik néhány szervetlen szigetelőpapír is. [10]

## 4 Szigetelőpapírok vizsgálata

Az aramid szigetelőpapírt kiváló szigetelési teljesítménye és jól ismert hőmérséklet-ellenállósága miatt ideális szigetelőpapírnak tekintik. Szinte minden ismert lapszigetelési alkalmazásban felhasználható. Az aramid könnyű és nagy szakítószilárdságú, tulajdonságait magas hőmérsékletű környezetben is megőrzi. [11]

Számos olyan anyag létezik, amely jó és olcsóbb alternatívája az aramidnak, hasonló, bizonyos alkalmazások terén akár jobb paraméterekkel. A mérésekhez kétféle szigetelőpapírt használtunk: triflexil és NMN papírokat. Több szigetelőpapír tulajdonságait összehasonlítva ezeket találtuk a leginkább megfelelőnek arra, hogy a kutatás során helyettesíteni tudják az aramid papírt.

A triflexil egy B szigetelési osztályba tartozó kraftpapír, amely szigetelő tulajdonságai 130 °C-on a legkedvezőbbek. A triflexilt elsősorban transzformátorokban használják. A benne található cellulóznak köszönhetően nagy szakítószilárdsággal rendelkezik. [12]

Az NMN egy háromrétegű laminátum, amely két Nomex papír rétegből és egy köztük lévő poliészterfóliából áll. A Nomex egy aramid típusú papír, amelyet leginkább 180 °C hőmérsékletig használnak. A poliészterfilm növeli a dielektromos szilárdságot és a stabilitást, továbbá alacsony a vízfelvétele, és a legtöbb vegyszerrel szemben jó az ellenállóképessége. Az iparban az NMN-t főként kisméretű motorok rész-, részburkolat- és fázisszigetelésére, valamint transzformátorok vagy más elektromos készülékek rétegek közötti szigetelésére használják. [13]



**2. ábra: Triflexil és NMN papír minták**

Néhány mérést végeztem a 3M által gyártott ThermaVolt, CeQUIN és TufQUIN típusú szigetelőpapírokon is. Ezek szervesen papírok, amelyeket magas hőmérsékleten használnak elektromos szigetelésként transzformátorokban, motorokban és generátorokban. Ezeknek a papíroknak számos különböző altípusa is létezik, vastagságuk, valamint termikus és elektromos tulajdonságaik alapján. Azáltal, hogy teljesen vagy nagy mértékben szervesen anyagból állnak, magas hőmérsékleten, hosszú távon sem veszítenek sokat elektromos és mechanikai tulajdonságaikból. [14] A vékony 3M minták többsége 1 kV alatti átütési feszültséggel rendelkezett, míg a vastagabb minták nem fértek be a mérésekhez használt doboz nyílásába. Három olyan típusú 3M papír volt, amelyek magasabb feszültségen ütöttek át, így további mérések indokoltak lehetnek velük: ezek 5-6 kV környékén ütöttek át AC feszültségen.

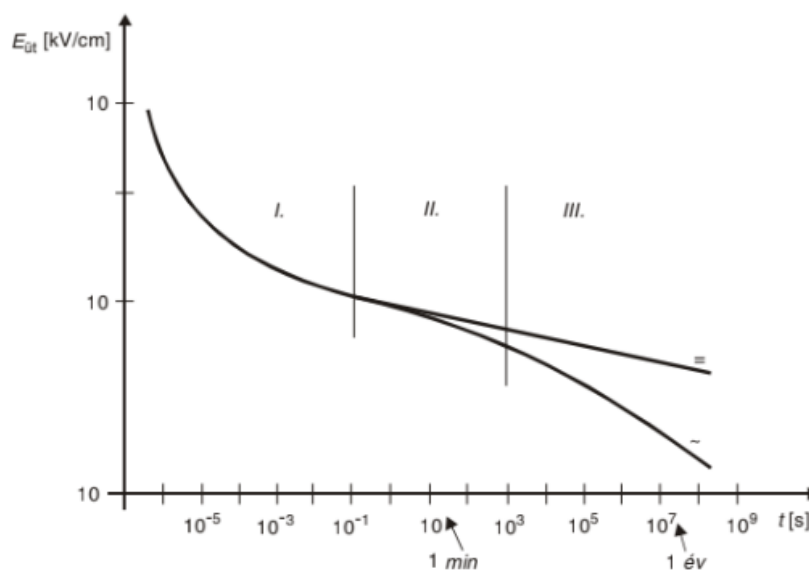
## 5 Átütési vizsgálatok

### 5.1 Átütési feszültség

A szigetelések villamos élettartamának meghatározásához szükség van egy élettartam-kritérium választására, amely általában az átütési feszültség. Az átütési feszültség az a feszültség, amelynél az adott szigetelés az anyag belsejében kialakuló ív következtében elveszíti szigetelőképességét. Az átütési feszültség függ a szigetelés anyagától, méretétől, állapotától és a vizsgálat körülményeitől is, például hogy éppen milyen típusú és időtartamú igénybevételek érik az anyagot, milyen hőmérsékleten és környezeti körülmények között.

A szigetelőanyagokban mindig vannak jelen pozitív és negatív ionok, melyek többé-kevésbé helyhez kötötten helyezkednek el. A villamos erőtér megjelenésekor az ionokra a térerősséggel és az ionok töltésével arányos erő hat, amely akkorára nőhet, hogy az összetartó erők ellenében kiszakítja a helyükről az ionokat. Az ekkor meginduló úgynevezett ionlavina kialakulása következtében a szigetelőanyag átütése azonnal, a másodperc törtrésze alatt bekövetkezik. A szigetelőanyagok általában hő-villamos átütésre hajlamosak, amely során az erőtér hatására keletkező hőveszteség is jelentős szerepet játszik. [15]

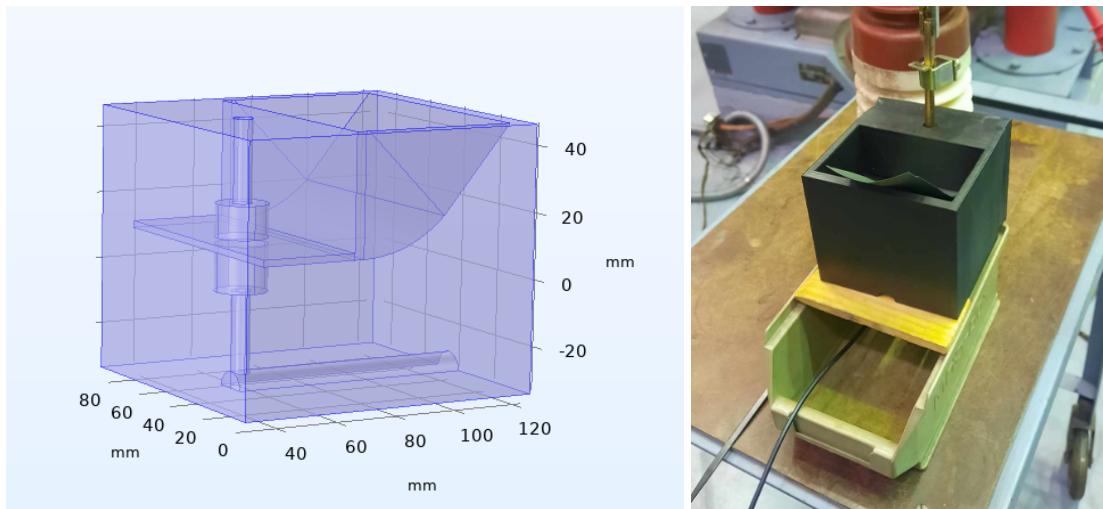
A szigetelések átütési szilárdságának időfüggését az alábbi ábra mutatja. Az I. szakaszban a villamos átütés, a II. szakaszban pedig a hő-villamos átütés következik be, míg a III. szakasz már az üzemi igénybevételek tartománya, itt történik az öregedés.



3. ábra: A szigetelés átütési szilárdságának időfüggése [15]

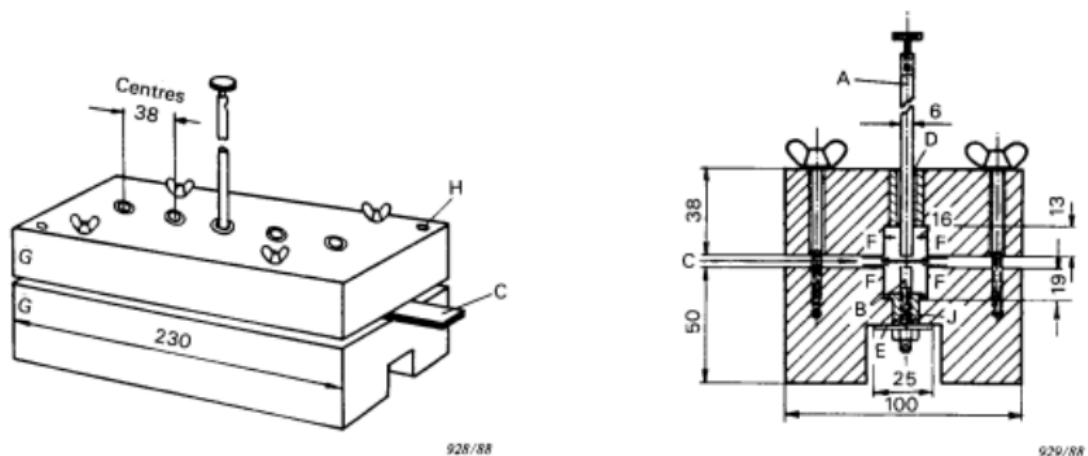
## 5.2 Szabványos elrendezés

Az átütési vizsgálatokhoz a mérési elrendezéseknek megfelelően egy dobozt kellett készíteni. Ehhez először FEM szoftverben, COMSOL Multiphysics-ben létrehoztuk a modellt, majd 3D nyomtatással elkészült a tényleges doboz. A doboz alatti tálca arra szolgál, hogy olajjal való mérések esetén összegyűjtse az olajat, a fadarab pedig stabilizálja a dobozt a tálcán.



**4. ábra: A COMSOL modell és a megépített doboz**

Az elrendezésnek a NEN-EN-IEC 60243-1 szabványnak kell megfelelnie, amely az európai szabvány a szigetelőanyagokon végzett tesztekhez. Ezek a tesztek a rövid távú elektromos szilárdság mérésére vannak szabva, tehát a szigetelőanyagokat a feszültség gyors növelésével vizsgáljuk, amíg meg nem történik az átütés. A legfontosabb előírások a szabványban az elektródokra vonatkoznak, azoknak minden esetben tisztának, a felületüknek simának és sérülésektől mentesnek kell lenniük. Az elektródok helyzete fix, nem gyakorolhatnak nagy nyomást a mintákra és nem torzíthatják az elektromos teret. [16] Az alábbi ábra egy tipikus szabványos elrendezést mutat elektromos szigetelőszalagok és -papírok méréséhez.

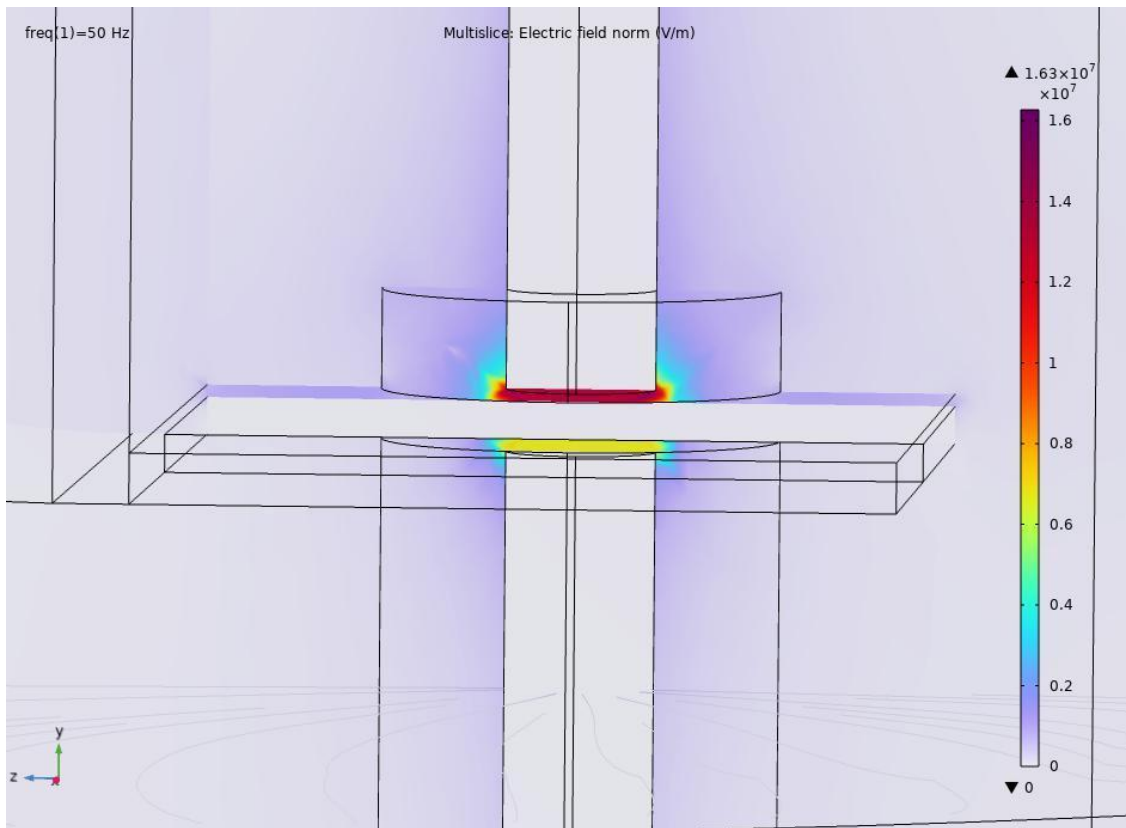


5. ábra: Szabványos elrendezések [16]

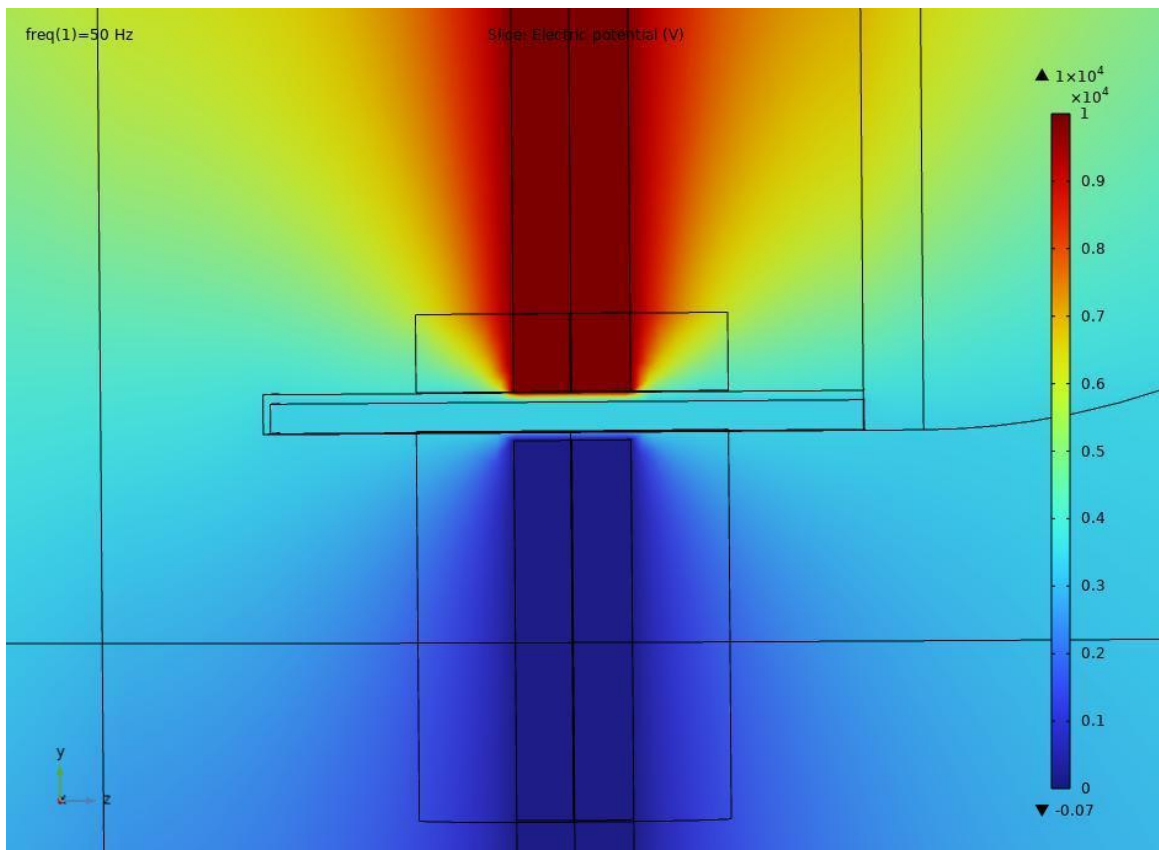
A szoftverben az elrendezésbe egy papír mintát is helyeztünk. A beépített könyvtárban található anyagok között nem volt szigetelőpapír, így az aramid tulajdonságai alapján kellett létrehozni egy új anyagot. Ahhoz, hogy térszámításokat tudjunk végezni, a papír elektromos és termikus tulajdonságaira is szükség volt, úgy mint a sűrűsége, hővezető képessége, relatív permittivitásra, hőkapacitásra és elektromos vezetőképessége. Ezeket az információkat az egyik aramid gyártó, a Nomex hivatalos oldaláról szereztük meg.

A létrehozott papír mintát a valós mintáknak megfelelő méretben hoztam létre: 10 cm hosszú, 5 cm széles, 0,2 mm vastag; majd az elrendezés minél pontosabb szimulációjához a doboz nyílásába helyeztem.

Ezt követően elvégeztem a térszámításokat a teljes elrendezésen. Az eredményeket az alábbi ábrák mutatják.



6. ábra: COMSOL modell a villamos térerősségről



7. ábra: COMSOL modell az elektromos potenciálról

Az ábrákon látható, hogy ugyan van tangenciális térerősség, de ez várhatóan nem befolyásolja drasztikusan az eredményeket, mivel a két elektród között a papír nagy villamos igénybevételnek van kitéve. Feltűnő ugyanakkor, hogy az elektródoktól távolodva a térerősség gyorsan csökken, a vizsgálat során ténylegesen igénybevett papírtérfogat viszonylag kicsi.

A méréseknél a doboz nyílásának mérete miatt fontos, hogy minden papírminta azonos hosszúságú és szélességű legyen, és beférjen az elektródok közé. A mintákat ollóval vágtam, a hajlított mintákhoz pedig két fémlapot használtam. A fémlapokra azért volt szükség, hogy egy pontosabb és egyenletesebb hajlítást kapjunk: az egyik fémlapot a papírra helyeztem úgy, hogy a felét a helyén tartsa, a másik fémlappal pedig a megfelelő szögben tudtam meghajlítani a papír szabad felét. A hajlított mérések pedig azért fontosak, mert már gyártás közben jelenhetnek meg kisebb mechanikai sérülések a papíron, melyek szintén befolyásolhatják a szigetelési képességet, így számításba kell venni őket. Az NMN papírok meghajlítása nehezebben ment, mint a triflexilé, vélhetően a három réteg miatt.



**8. ábra: Triflexil minta hajlítása fémlapokkal**

A  $180^\circ$ -ban meghajlított mintákat a hajlítás után még egy adott nehézségű tárgy alá helyeztük a kész mintákat, hogy a mechanikai sérülés még jelentősebb legyen rajtuk.



### 5.3 AC mérések

Az AC méréseket a laboratórium 30 kV-os mérőterében végeztem. A mérőtér nagyfeszültségű kimenetét egy transzformátor biztosítja.

Ipari szempontból ezek a mérések a leginkább relevánsak, hiszen az elektromos autóknál az AC motorok a leggyakoribbak.



**9. ábra: A 30 kV-os mérőtér**

Összesen 20 mintát mértem mind a triflexil, mind az NMN papírokból, ezekből adódtak ki az átlagos átütési feszültségek. Az alábbi táblázat a triflexil átlagos átütési feszültségét mutatja különböző mértékű hajlítások esetén. A feszültség méréséhez multimétert használtam.

**1. táblázat: A triflexil átlagos átütési feszültségei AC feszültségen**

<b>Hajlítás mértéke</b>	<b>Átütési feszültség (kV)</b>
–	6,15
45°	6,59
90°	5,89
180°	5,76

Látszik, hogy a 45°-os hajlításnak még nincsen jelentős hatása a szigetelési képességre, azonban 90° és 180° esetén már csökkent az átütési feszültség. Ezek az értékek azonban még mindig magasnak számítanak.

A következő táblázat az NMN papír átlagos átütési feszültségeit mutatja.

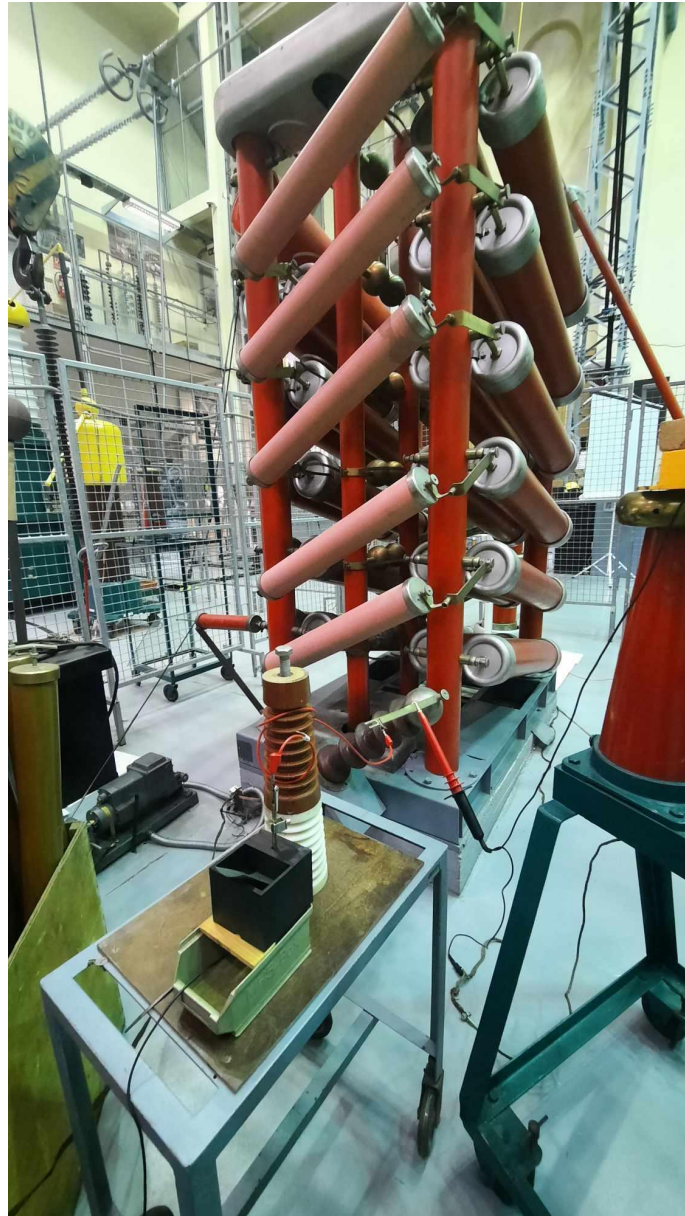
**2. táblázat: Az NMN átlagos átütési feszültségei AC feszültségen**

<b>Hajlítás mértéke</b>	<b>Átütési feszültség (kV)</b>
–	6,15
45°	5,65
90°	5,56
180°	5,67

Az NMN hajlítás nélküli átlagos átütési feszültsége megegyezik a triflexilével, azonban a mechanikai sérülések által folyamatosan csökkent. Az egyes hajlítások mértéke között jelentős különbség azonban nincsen.

## 5.4 Egyenirányított AC-val végzett mérések

A DC mérések előtt egy másik típusú mérést is végeztem, amihez a laboratórium 750 kV-os lökésgerjesztőjének DC táplálását használtam. Ezek egyenirányított AC-val végzett mérések voltak, melyek során pozitív hullámok követik egymást.



**10. ábra: A 750 kV-os lökésgerjesztő**

A DC méréseket pozitív és negatív polaritáson is mértem. Ezekből a típusú mérésekből nem végeztem el mindet az összes típusú hajlításon, ugyanis az AC és DC

mérések azok, amelyek elsősorban relevánsak; ez a típusú mérés csupán azért érdekes, mert ez szimulálja a legjobban azt a környezetet, amely egy elektromos autó motorjában is előfordul.

Az alábbi táblázatok mutatják először a triflexil, majd az NMN átlagos átütési feszültségét az AC-val eltolt DC feszültségen. Mindegyikből 10 mintát mértem.

**3. táblázat: A triflexil átlagos átütési feszültségei egyenirányított AC feszültségen**

Hajlítás	Átütési feszültség (kV)	
	Pozitív	Negatív
–	6,59	-7,37
45°	9,42	-8,13

**4. táblázat: Az NMN átlagos átütési feszültségei egyenirányított AC feszültségen**

Hajlítás	Átütési feszültség (kV)	
	Pozitív	Negatív
–	12,76	-11,68
45°	-10,72	-10,31

A triflexilnél a hajlítások nem a várt eredményt hozták, az átütési feszültség magasabb volt, mint hajlítás nélkül. Ennek több oka is lehet. Az egyik, hogy a hajlítás egy bizonyos ponton okoz sérülést a mintán, ennek a pontnak pedig tökéletesen illeszkednie kell az elrendezés két elektródja közé, különben a sérülés mellett, az ép papíron jön létre az átütés. Néhány mintán látható is volt, hogy a hajlítás mellett ütött át. A másik befolyásoló tényező, hogy amikor a mintákat az elrendezésbe helyezzük, akkor a nyílásba nem mindig férnek bele tökéletesen a papírok. A papír vastagsága és a nyílás szélessége megegyezik, így a behelyezés által gyűrődhet, sérülhet a minta. A triflexilnél ez kevésbé volt jellemző, de egyes NMN mintákat nehezebb volt behelyezni a nyílásba. Ezek az apró sérülések a hajlítás nélkül mért mintákon is jelenthetnek olyan mértékű mechanikai igénybevételt, hogy alacsonyabb feszültségen ütnék át. A pontosabb mérésekhez egy új elrendezés készítése lehet indokolt, melybe könnyebben beférnek a papírok, nem gyűrődnek vagy sérülnek meg. A papírok sérülését még a minták gyártásához is vissza lehet vezetni, hiszen ahogyan kézzel vágtam és

hajlítottam őket, elképzelhető, hogy nem várt sérülések is megjelentek a papírokon. Az iparban ez könnyebben elkerülhető, a mintákat géppel vágják formára.

Egy további indok az elektródok elhasználódása lehet. Minden mérés után megtöröltem az elektródot, hogy a rajta lévő korom és egyéb kosz ne befolyásolja a méréseket, azonban csak a felső elektródhoz férünk hozzá, az alsó ellenőrzéséhez a teljes elrendezést szét kellene szedni, ami a jelenlegi állapotában nem lehetséges.

## 5.5 DC mérések

A DC méréseket szintén a 750 kV-os lökésgerjesztő DC táplálására kötve végeztem, mind pozitív, mind negatív polaritáson.

Az alábbi táblázatok a triflexil és az NMN átlagos átütési feszültségeit mutatja, minden esetben 10 mintát mértem.

5. táblázat: A triflexil átlagos átütési feszültségei DC feszültségen

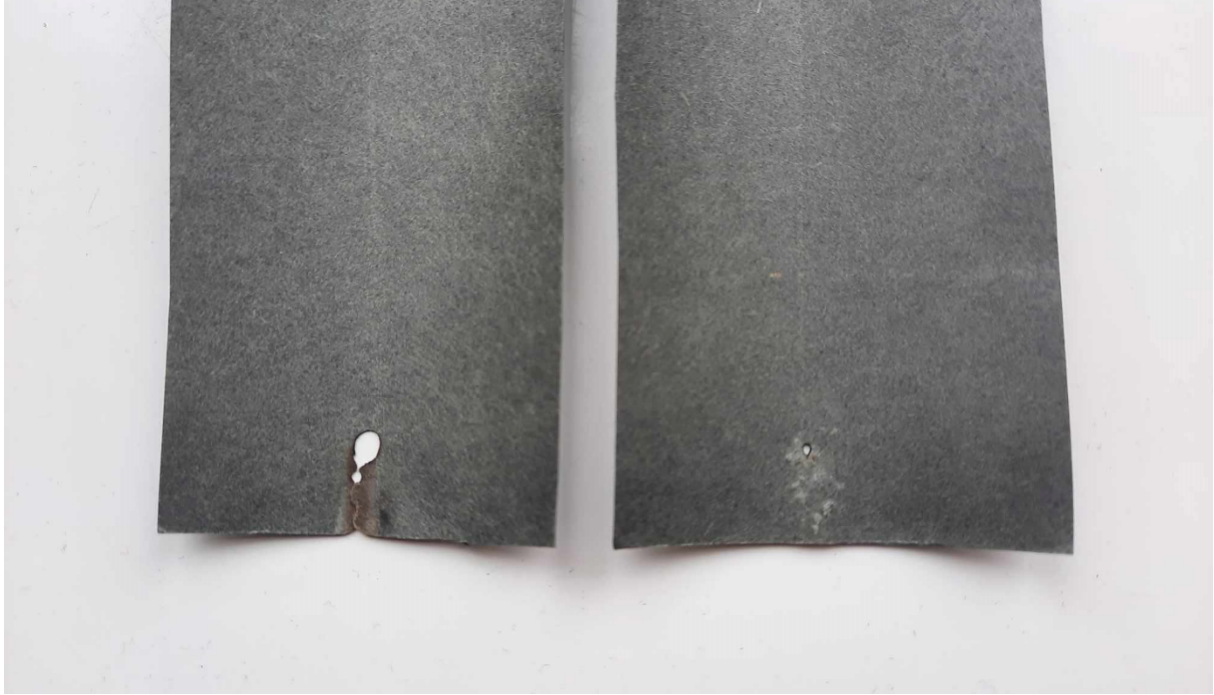
Hajlítás	Átütési feszültség (kV)	Átütési feszültség (kV)
	Pozitív	Negatív
–	18,51	-15,90
45°	16,29	-11,72

6. táblázat: Az NMN átlagos átütési feszültségei DC feszültségen

Hajlítás	Átütési feszültség (kV)	Átütési feszültség (kV)
	Pozitív	Negatív
–	16,44	-16,38
45°	15,96	-15,72

Az átütési feszültségek átlagaiból jól látszik, hogy az egyenfeszültséget jobban elviselik a szigetelőpapírok, mint a váltakozó feszültséget vagy az egyenirányított AC-t; az átlagos átütési feszültség akár 10 kV-al is nagyobb DC esetben. Amikor a DC feszültség értékét mérjük, akkor a maximum csúcsértékről beszélünk. Ugyanaz az érték AC feszültség esetében azonban nem a csúcsérték, hanem a négyzetes közép (RMS: root mean square). Például 220 V DC feszültség 311 V AC feszültségnek felel meg. A szigetelésnek nem az RMS értéket, hanem a csúcsértéket kell elviselnie, ezért az AC feszültségű környezetben alkalmazott szigetelésnek ellenállóbbnak kell lennie. [17]

Az AC és DC feszültség közötti különbséget a mintákon található átütés nyoma is jól mutatja.



**11. ábra: AC és DC feszültség alatt átütött triflexil minták**

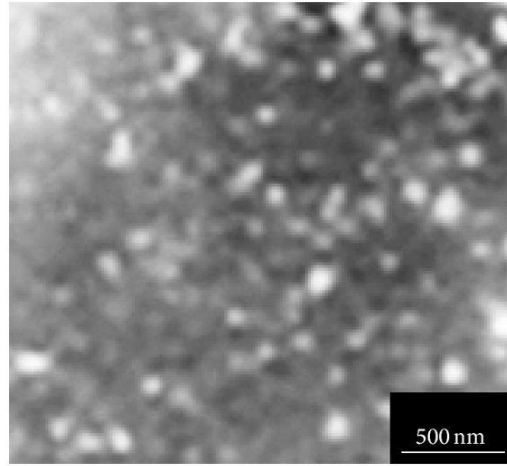
## 6 Olaj-papír szigetelés

Az iparban az olaj-papír szigetelést használják a leggyakrabban, ezért várható, hogy ez a szigetelés áll ellen a legnagyobb igénybevételnek és a legnagyobb feszültségnek. Az ilyen típusú szigeteléseknél a szilárd szigetelőanyag és a szigetelőolaj többszörösen összetett, sorosan és párhuzamosan rétegezett szerkezetben található meg. Az olaj és a papír szoros kölcsönhatásban van egymással. A papír megköti az ionos anyagok, az öregedési termékek és a víz egy részét, amelyek miatt az olaj vezeti az elektromosságot, ezzel növelve az olaj fajlagos ellenállását. A papír bomlása során keletkező vegyületek pedig részben beépülnek az olajba. Az öregedés mellett a nedvesedés is rontja az olaj-papír tömítést, ami meghibásodást okozhat. Ezt nagyban befolyásolja a papír víztartalma, amelynek növekedése gyorsítja az öregítést. Ilyenkor nem tisztán a villamos vagy hő-villamos átütés, vagy a papír villamos szilárdságának csökkenése okozza a szigetelés roncsolódását, hanem a mechanikai szilárdság elvesztése. A nedvesség kívülről, a légkörből is kerülhet a szigetelésbe, de öregedési termékként, a papírban található cellulóz termikus bomlása során is keletkezik. [15]

Ha a vizsgálatokat szigetelőfolyadékban végzik, a használt folyadék az IEC 60296 nemzetközi szabvány szerint transzformátorolaj lehet. A transzformátorolajnál nagyobb relatív permittivitású folyadékban vizsgált próbatestek nagyobb villamos szilárdságot mutathatnak, mint a transzformátorolajban vizsgáltak. Az olaj vagy más folyadék villamos szilárdságát csökkentő szennyeződések szintén növelhetik a próbatestek mért villamos szilárdságát. [18]

A papírok impregnálásának első lépése általában a papír vákuumkamrába helyezése, ahol akár több napon keresztül kiszáritják őket magas hőmérsékleten. Ezt követően a vákuumkamrában lévő üvegcsövekbe töltik a szigetelőolajat, amelyben a papírok körülbelül egy napig áznak. [19]





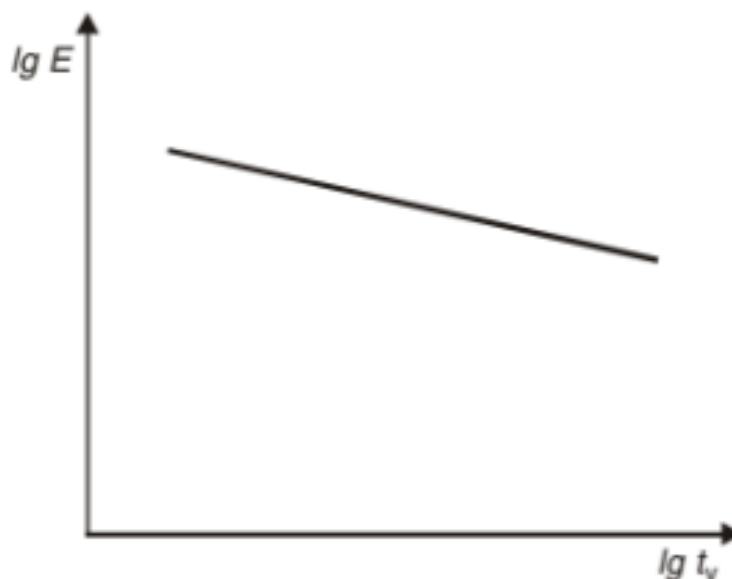
**12. ábra: Olaj-papír szigetelés elektronmikroszkóp alatt [19]**

## 7 Szigetelések öregedése és degradációja

### 7.1 Szigetelőpapírok öregítése

A szigeteléseket befolyásoló legfontosabb romlási folyamat az öregedés. Öregedésnek nevezzük a szigetelőanyagokban lejátszódó fizikai és kémiai folyamatok összességét, amelyek a szerves szigetelőanyagok elektromos és fizikai tulajdonságainak irreverzibilis romlását okozzák. Működés közben a szigetelés egyszerre van kitéve elektromos, termikus, környezeti és mechanikus igénybevételeknek, melyek együttes hatása az elektromos tulajdonságok folyamatos romlásához, így az élettartam csökkenéséhez vezet.

Az élettartamot legnagyobb mértékben a hő- és a villamos igénybevétel befolyásolja. Hő hatására csak a szerves szigetelőanyagok öregednek, tehát a papír is; a szervetlenek üzemi hőmérséklet esetén gyakorlatilag nem öregsznek. Az alábbi ábra azt mutatja, hogy a villamos igénybevételek hogyan befolyásolják a szigetelés élettartamát. Az élettartamot a villamos élettartamgörbe írja le:  $t_v = f(E)$  [15]



13. ábra: Élettartam a villamos igénybevétel függvényében [15]

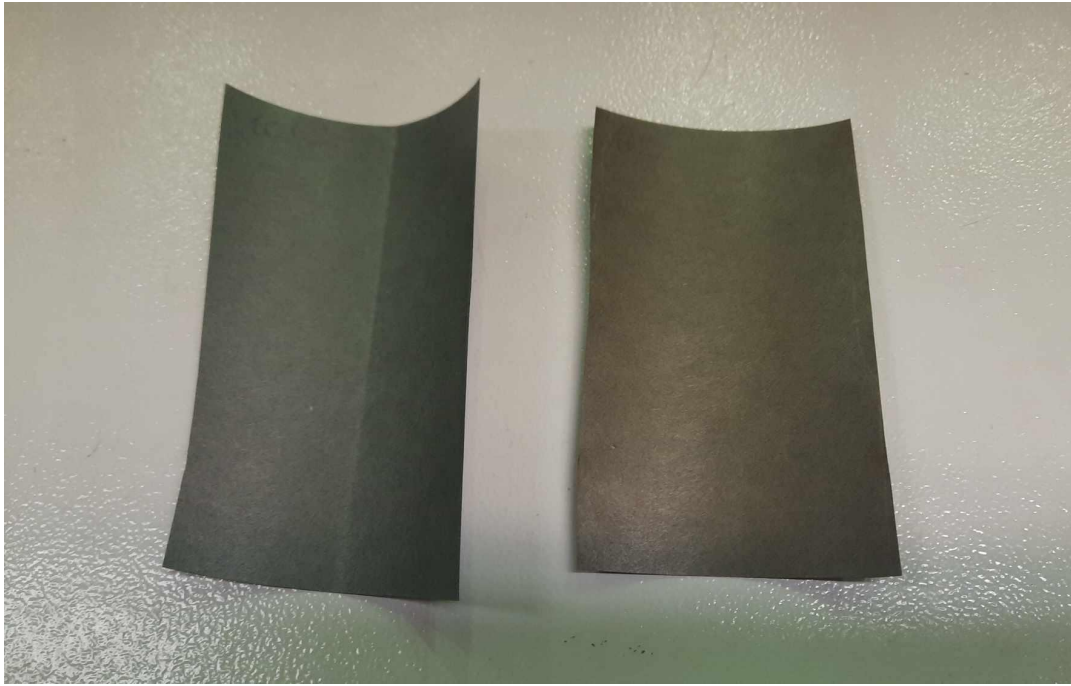
A szigetelőpapírok öregedésének vizsgálatához a mintákat egy öregítő kemencébe helyeztük, amelyben a levegőztető rendszernek köszönhetően minden papír azonos hőmérsékleten volt. A hőmérsékletet először 210 °C-ra állítottuk be, majd a kezdeti nagy

igénybevétel után először 180, majd 150 °C-ra csökkentettük le. A kemence 10 napig napközben folyamatosan üzemelt, éjszakára kapcsoltuk csak le.



**14. ábra: Szigetelőpapír minták az öregítő kemencében**

A mintákat minden ki- és bekapcsoláskor ellenőriztük, így már az első napon feltűnt, hogy az NMN papír elszíneződött és szemmel láthatóan roncsolódott, a széle megégett; a triflexilnek csak a színe lett fakóbb. Ugyanezt az állapotot figyeltük meg a 10. napot követően is, amikor a minták kikerültek a kemencéből.



**15. ábra: Új (bal) és öregített (jobb) triflexil minták**

## 7.2 Öregített mintákon végzett mérések

Az öregített mintákkal szemben az volt az elvárás, hogy alacsonyabb feszültségen fognak átütni. A korábbi mérések során kiderült, hogy az egyenfeszültséget jobban viselik a szigetelőpapírok, így az öregített mintákat is DC feszültség alatt mértem.

Az alábbi táblázat az öregített triflexil papírokon végzett mérések átlagát mutatja. Minden öregített papírból 1-1 mintát vizsgáltam meg első körben. A triflexil mintákat azelőtt hajlítottam meg, hogy a kemencébe helyeztem volna őket.

7. táblázat: Öregített triflexil papírok átlagos átütési feszültségei DC feszültségen

Hajlítás	Átütési feszültség (kV)	
	Pozitív	Negatív
–	14	-10,5
45°	11,5	-10,9
90°	10,2	-9,8
180°	8,2	-8,4

Jól látszik, hogy az egyes hajlítások még inkább roncsolják a papírt, csökkentik a szigetelőképeséget. A nem öregített mintákhoz képest is feltűnő a különbség, hajlítás nélkül 4-5 kV-al csökkent az átütési feszültség átlagos értéke, és az egyes hajlítások is sokkal jelentősebben befolyásolták a szigetelést – az új mintáknál nem volt ennyire jelentős különbség. Ennek ellenére az értékek így is magasnak számítanak, a hajlítás nélküli öregített minták esetében.

Ezen kívül az átütött papírok jobban is roncsolódtak, a 9. ábrán látható átütéshez képest.



**16. ábra: DC feszültség alatt átütött, öregített triflexil minták**

NMN papírból csak hajlítás nélküli minták kerültek a kemencébe, így csak ezeket mértem szintén pozitív és negatív polaritású DC feszültség alá helyezve. Az alábbi táblázat mutatja az átlagos átütési feszültségüket.

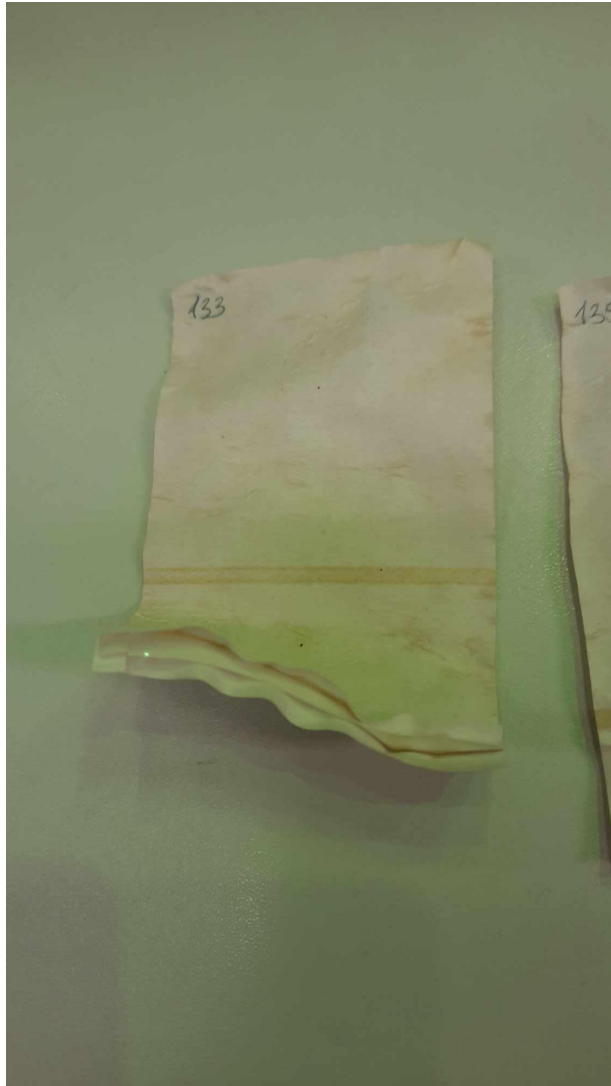
**8. táblázat: Öregített NMN papírok átlagos átütési feszültségei DC feszültségen**

<b>Hajlítás</b>	<b>Átütési feszültség (kV)</b>	<b>Átütési feszültség (kV)</b>
	<b>Pozitív</b>	<b>Negatív</b>
–	10,9	-12,3

Az öregített NMN papír is jóval hamarabb átütött, mint az új minták, azonban ezek az értékek még így is magasnak számítanak.

A jövőben azt is érdemes lehet megvizsgálni, hogy mennyiben tér el az átütési feszültség, ha csak az öregítés után hajlítjuk meg a papírokat – számít-e, hogy az egyes igénybevételek milyen sorrendben követik egymást a szigetelés esetén. Várhatóan a kiszáradt és roncsolódott öregített minták a hajlítás hatására még jelentősebb mértékben fognak sérülni.

Ezelőtt még meghajlított NMN papír mintákat is kell öregíteni, hogy össze lehessen hasonlítani az egyes értékeket.



**17. ábra: DC feszültség alatt átütött, öregített NMN minta**

## 9 További mérések

Az eddigi tapasztalatok alapján a pontosabb értékeléshez szükséges megvizsgálni, hogy a hajlítások során, illetve a hajlítás nélküli minták vizsgálatakor egyéb sérülések is bekövetkeztek-e, amik befolyásolják a szigetelőképeséget.

Méréseket hajtásinverterek által generált jelalakok mellett is érdemes végezni, továbbá az átütési vizsgálatokat a várható maximális üzemi hőmérsékleten folytatva fogunk teljes képet kapni az egyes anyagok tulajdonságairól. A további mérések magukban foglalják az öregítés után meghajlított mintákkal végzett méréseket, valamint az olaj-papír szigetelést, akár több különböző típusú olajjal is.

A mérésekhez egy új elrendezés készítése is indokolt lehet, amelyben fontos, hogy az alsó elektródhoz is hozzáférjünk, illetve roncsolódás nélkül bele lehet helyezni a papírokat. Amennyiben több olajjal szeretnénk mérést végezni, több elrendezést kell készíteni. Az olajokat ugyanis a doboz nyílásán keresztül tudjuk a szigetelőpapírhoz önteni, azonban így a különböző típusú olajok a doboz megtisztítása után is benne maradhatnak az elrendezésben, és befolyásolhatják a mérési adatokat.



## 10 Összefoglalás

Az általában kis- és középvezetésű alkalmazott NMN és a triflexil szigetelőpapírok is képesek ellenállni a nagyvezetésűeknek. A papírok a feszültségek jellemzői miatt jobban viselik az egyenfeszültséget, mint a váltakozó feszültséget vagy az egyenáramú AC-t, így elsősorban DC motorok szigetelésére lennének alkalmasak. Fontos megjegyezni, hogy a hajlítás okozta bizonyos mértékű sérülés csökkenti a szigetelési teljesítményt – ugyan a csökkenés értéke nem mindig jelentős, de hosszú távon komolyabb problémákat is okozhat. Érdeemes lenne megvizsgálni, hogy van-e olyan módszer, amellyel a sérülések valószínűsége vagy mértéke mérsékelhető. Az öregítés hatására a papírok jóval alacsonyabb feszültségen ütöttek át, azonban még ezek is viszonylag magas értéknek számítottak.

Összefoglalva, mindkét szigetelőpapír alkalmazható elektromos járművek nagyvezetésű motorjának szigetelésében.

## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretném megköszönni konzulenseim, Dr. Cselkó Richárd és Székely László munkáját. Az ő szakmai tudásuk és segítségnyújtásuk nélkül ez a dolgozat nem jöhetett volna létre.

Emellett szeretném megköszönni a Villamos Energetika Tanszék Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoportjának a kutatáshoz szükséges eszközök biztosítását, a Nagyfeszültségű Laboratórium munkatársainak pedig a közreműködést és segítséget a mérések során.

## Irodalomjegyzék

- [1] Davoud Esmail Moghadam, Christoph Herold, and Rolf Zbinden, Von Roll Institute for High-Voltage Insulation Breitenbach, Switzerland, Electrical Insulation at 800 V Electric Vehicles, Conference Proceedings of ISEIM 2020
- [2] M. Zeraouila, M.E.H. Benbouzid, and D. Diallo, "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study", Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference, Volume , Issue , 7-9 Sept 2005, pp. 8-15.
- [3] Davoud Esmail Moghadam (2020). The future of e-cars – will high-voltage system become a new standard?. JEC Composites Magazine. 30-33.
- [4] N. Hashemnia and B. Asaei, "Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles," 2008 18th International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800157.
- [5] Sri Hari Karthik, Types of Motors used in Electric Vehicles, Circuit Digest, 2019
- [6] 3. G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, H. Dhirani, Electrical insulation for rotating machines: design evaluation aging testing and repair, John Wiley & Sons, vol. 21, 2014
- [7] Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, evaluation, aging, testing, and repair, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, ISBN 978-1-118-05706-3
- [8] S. Grzybowski, S. Bandaru, N. Kota, C. F. King, Lifetime characteristics of magnet wires under pulse voltage, 2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena
- [9] National Insulation Association, insulation.org (2023.11.01.)
- [10] ASTM Paper and paperboard: characteristics, nomenclature, and significance of tests, ASTM, 1951
- [11] Jiping Bai, Fiber-reinforced polymer types and properties, in Advanced Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications, 2023

- [12] <https://zotek.hu/sik-szigetelo-anyag/kraft-pet-kraft--b-130c-> (2023.11.01.)
- [13] <https://www.yaanelectric.com/flexible/55.html> (2023.11.01.)
- [14] <https://www.3m.com> (2023. 11. 01.)
- [15] Luspay Ödön, Közép- és nagyfeszültségű hálózatok diagnosztikai vizsgálata, 2000, Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete
- [16] NEN-EN-IEC 60243-1 1998, European Standard: Electrical strength of insulating materials – Test methods
- [17] <https://www.electricaltechnology.org/2012/12/what-is-difference-between-volta-meter.html> (2023.11.01.)
- [18] IEC 60296-2020, International Standard: Fluids for electrotechnical applications – Mineral insulating oils for electrical equipment
- [19] Ruijin Liao, Cheng Lv, Lijun Yang, Yiyi Zhang, Weiqiang Wu, Chao Tang, "The Insulation Properties of Oil-Impregnated Insulation Paper Reinforced with Nano-TiO<sub>2</sub>", Journal of Nanomaterials, vol. 2013, Article ID 373959, 7 pages, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/373959>