



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Indukálóhatás vasúti környezetben

Elmélet és gyakorlat, hitek és tévhitek

Szerzők:

Babai András

Török Regina

Konzulens:

Dr. Ladányi József

2024. november 3.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamos Energetika Tanszék



Abstract

Magyar

Napjainkban, amikor a villamos berendezések egységteljesítménye és energiaigénye növekszik, a berendezések érzékenysége szintén növekvő tendenciát mutat. Ekkor válik igazán fontossá az elektromágneses összeférhetőség kérdésköre. Ilyen terület a nagyvasúti villamos vontatás és a biztosítóberendezések üzeméhez szűk sávos vasúti vonalkábel együttműködése.

Gyakorlati példánkban, a vasúti rendszereknél használatba vett kisfeszültségű távközlő kábeleket vizsgáltuk. Ezek biztosítják a vasúttal kapcsolatos információk, adatok megfelelő áramlását és működtetik a biztosítóberendezéseket is. Emiatt megfelelő és biztonságos működésük kulcskérdés. A villamos környezetből adódó zavarok befolyásolják a kábel működését, indukált feszültség jelenhet meg a vonalkábel vezető erein, amelyet csillapítani szükséges. Ez az indukált feszültség veszélyes lehet a berendezésekre, illetve veszélyforrást jelenthet az üzemeltető személyzetre.

Az indukált feszültség csökkentésére egy egyszerű fizikai elvet használunk fel, a földben folyó árammal ellentétes áramot hozunk létre, melynek elektromágneses tere képes kompenzálni a földáram mágneses terét. Mindezt megfelelő, kétrétegű (árnyékolás és páncélzat) burkolással érjük el. A csökkentés mértékét az ún. védőtényezővel jellemezhetjük.

Laboratóriumi méréseink során azt vizsgáltuk, hogy a védőtényező értéke milyen villamos és anyagi jellemzőktől függ. Mekkora és milyen szerepe van az ún. páncélnak, árnyékolásnak a megfelelő védőtényező kialakításában? Két vizsgált kábel páncéljának összehasonlításával pedig arra kerestük a választ, hogy hogyan képesek a gyártástechnológia és az anyagjellemzők befolyásolni az egyes kábelek védőtényezőjét.

A téma manapság is aktuális, számos új megválaszolatlan kérdést rejt magában. A megnövekedett vontatási áramok egyre több problémát okoznak az indukáló hatás területén. A dolgozat érdekes és újszerű eredményekkel járul hozzá a témakör bizonyos problémáinak megértéséhez, a megfelelő megoldások kidolgozásához.

English

In today's world, as the power and sensitivity of electrical systems increase, addressing Electromagnetic Compatibility (EMC) becomes crucial. One such area of focus is electric traction and the signaling cables used for its safety devices.

In our study, we examined low-voltage railway signaling cables. These cables are designed to transmit essential data and information about the railway system, as well as to operate safety devices along the railway. Therefore their precise and reliable functioning is critical. However, without proper awareness, higher voltages may be induced in these cables, posing risks.

Voltage reduction can be achieved by surrounding the transmission cable wires with a conductive layer. In this layer, current is generated by the continuously changing magnetic field. According to Lenz's law, this current opposes the magnetic field (flowing in the opposite direction to the inducing current), thus weakening the magnetic field inside the layer compared to outside. This effectiveness is quantified by the screening factor.

In our measurements, we explored the dependency of the screening factor on electrical and material parameters. What role does the steel tape armor play? What role does the copper layer serve?

This topic remains highly relevant today, especially with the increasing traction currents appearing globally. Our study presents new findings that aim to clarify certain issues and propose new solutions.

Köszönetnyilvánítás

Jelen dolgozat nem valósulhatott volna meg konzulensünk, Dr. Ladányi József kitartó segítségével nélkül. Köszönjük neki a támogatást, mind a mérések szervezésében, mind a szükséges elméleti háttér elsajátításában.

Köszönjük a mérési eredmények feldolgozása során nyújtott támogatást Dr. Mohos Andrásnak.

A dolgozat második része, az anyagtechnológiai mérések és vizsgálatok, nem valósulhatott volna meg a Gillomet László Szakkollégium két tagja, Gábrriel Bálint és Korsós Krisztián, által nyújtott önzetlen segítség nélkül, akik időt és energiát szántak a szükséges mérések elvégzésére és szakmai útmutatásaikkal előrelendítették kutatásunkat.

Tartalomjegyzék

Abstract	i
Köszönetnyilvánítás	iii
1. A témakör gyakorlati jelentősége	1
1.1. Kábel felépítése	2
2. Elméleti alapok	3
2.1. Vasúti környezet	3
2.1.1. Kábel védőtényező	4
2.1.2. Belső (transzverzális) védőtényező	4
2.1.3. Köpeny-föld hurok impedanciát figyelembe vevő védőtényező	5
2.2. Köpenyjellemzők szerepe a védőtényező kialakításában [2]	5
2.2.1. Belső felületi impedancia	5
2.2.2. Külső felületi impedancia	6
2.2.3. Árnyékolás szerepe	6
2.2.4. Páncél szerepe	6
2.3. Relatív permeabilitás hatása a védőtényező értékére	7
2.3.1. Relatív permeabilitás meghatározása	7
2.3.2. Relatív permeabilitás áramfüggése	7
3. Védőtényező mérés	9
3.1. Mérés célja	9
3.2. Mérési elrendezés	9
3.2.1. Földvisszavezetési impedancia leképezése	9
3.2.2. Indukáló hatás leképezése	10
3.2.3. Mérés felépítése	10
3.2.4. Feszültségmérés	12
3.2.5. Árammérés	12
3.2.6. Fáziszög-mérés	13
3.3. Mért értékek, eredmények	14
3.3.1. Mért értékek, eredmények	14
3.4. Kiértékelés	15

4. A páncél és árnyékolás szerepe	16
4.1. Mérési elrendezés	16
4.2. Áramvezetés csak az árnyékoláson	17
4.3. Áramvezetés csak a páncélon	18
4.4. Kiértékelés	20
5. Relatív permeabilitás mérés	21
5.1. Mérés célja	21
5.2. Mérési elrendezés	21
5.2.1. Mérés felépítése, páncél előkészítése	21
5.2.2. Feszültségmérés	23
5.2.3. Árammérés	23
5.3. Mért értékek, eredmények	24
5.4. Kiértékelés	25
6. Anyagtechnológiai kitekintés	26
6.1. Vizsgálatok célja	26
6.2. Vizsgálatok folyamata	26
6.3. Eredmények kiértékelése	28
6.4. Kiértékelés	32
6.4.1. Acél mágneses permeabilitása	32
6.4.2. Bevonat tulajdonságai	32
7. Konklúzió	34
8. Felhasznált irodalom	35

1 A témakör gyakorlati jelentősége

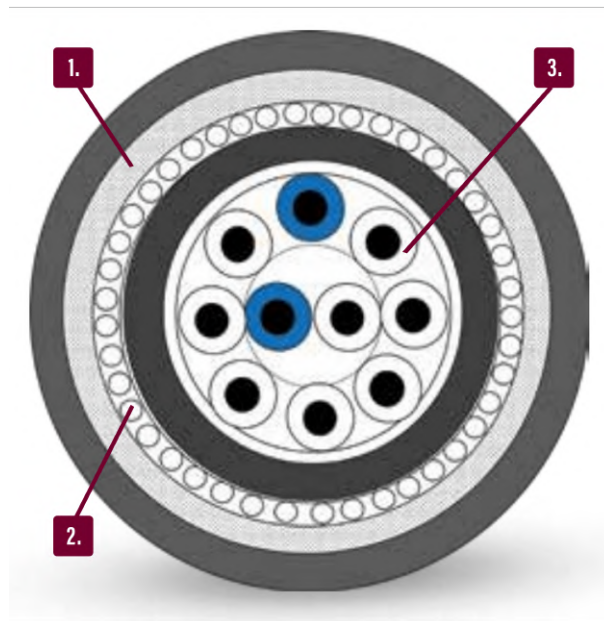
A vasúti rendszereknél elengedhetetlen a törpefeszültségű (max. $50V_{AC}$) távközlő és vonalkábelek alkalmazása. Ilyenekről működnek többek között a biztosítóberendezések is. Ezek a vonalkábelek kisfeszültségű berendezésekben végződnek, jelentősebb áramütés elleni védelem nélkül, a törpefeszültség miatt. A kábelek a vasúti pálya közvetlen közelében, 5 – 10 méteres távolságra fekszenek és akár 10 – 12km hosszan párhuzamosan futnak a vasúti pályával.

A villamos vontatási rendszerben a mozdonyok által a felsővezeték-rendszerből felvett áram ($100 - 1000A$) a sínekben, a földben és ha van, az áramvisszavezetőkön folyik vissza a vontatási állomásokba. A vonalkábelben minden áramkomponens (felsővezeték, sín, föld, áramvisszavezető) külön-külön indukál feszültséget és végül ezek szuperpozíciója adja meg az eredő indukált feszültséget a kábel erei és a föld között (közös módusú feszültség). Változó áram ($AC, 25kV$) folyamatosan változó mágneses teret hoz létre. Ez a változó mágneses tér Lenz törvénye szerint zárt hurokban feszültséget indukál. Esetünkben a már említett vonalkábel árnyékolása a végpontokon földelt és így zárt huroknak (árnyékolás-föld hurok) tekinthető. Ebben a hurokban hosszanti feszültség (elektromotoros erő - EMF) indukálódik, amelynek hatására a kábel árnyékolásában – *mivel zárt* - áram fog folyni. A vonalkábelben indukált feszültség egyenes arányban áll az indukáló áram nagyságával és a párhuzamos együttfutási hosszal, így könnyen belátható, hogy az egyébként kis feszültségű vonalkábelekben akár veszélyes nagyságú feszültség indukálódhat.

Az indukáló hatás elleni védekezéshez a vonalkábel megfelelő árnyékolás kialakítása elengedhetetlenül fontos. Dolgozatunk további részében bemutatjuk a jelenség pontos leírását és megoldásokat keresünk a hatékony árnyékolás érdekében.

1.1 Kábel felépítése

Az általunk vizsgált kábelek sematikus felépítése az alábbi ábrán látható.



1. Kép | Vizsgált kábelek sematikus felépítése

1. **Páncél:** két acélszalag, amelyek minimum 35 százalékos átlapolással kerülnek feltekercsésre a kábelre adott menetemelkedés mellett
2. **Árnyékolás:** réz elemi vezetőkből álló u.n. rézhuzal koszorú árnyékolás, a rézhuzalok egymással párhuzamosan, nagy menetemelkedésű spirál alakban futnak
3. Védeni kívánt kábel erek

A páncélt és az árnyékolást együttesen köpenynek nevezzük a továbbiakban. A páncél és az árnyékolás a kábel végpontokon villamosan össze vannak kötve.

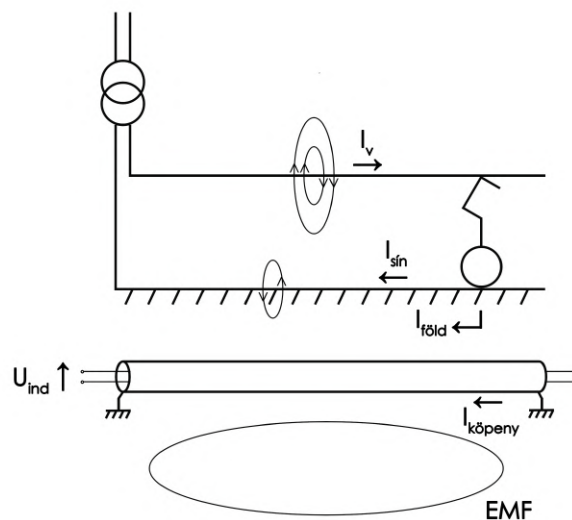
2 Elméleti alapok

2.1 Vasúti környezet

A következő fejezet a jelenségek megértéséhez szükséges elméleti részt foglalja össze. Amint korábban írtuk, a villamos vontatási rendszerben a mozdonyok által a felsővezeték-rendszerből felvett áram ($100 - 1000A$) a sínekben, a földben és ha van, az áramvisszavezetőkön folyik vissza a vontatási állomásokba. A vonalkábelben minden áramkomponens (felsővezeték, sín, föld, áramvisszavezető) külön-külön indukál feszültséget és végül ezek szuperpozíciója adja meg az eredő indukált feszültséget a kábel erei és a föld között (közös módusú feszültség). Váltakozó áram ($AC, 25kV$) folyamatosan változó mágneses teret hoz létre. Ez a változó mágneses tér Lenz törvénye szerint zárt hurokban feszültséget indukál.

$$U_{ind} = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Ez az indukált feszültség a több, akár $10 - 12km$ -es kábelhossz miatt, meghaladhatja az érintési limitfeszültséget (személyek biztonsága szempont) és berendezések feszültségtűrését (elektromágneses kompatibilitási (EMC) szempont). Azonban, ha a kábelt, megfelelő köpennyel látjuk el, a földelt köpeny és föld zárt hurkot képez. Lenz törvénye alapján a zárt hurokban feszültség indukálódik (EMF), ami a köpenyben egy $I_{köpeny}$ áramot hoz létre. Mivel a köpenyáram pont ellentétes irányú mágneses teret hoz létre, kompenzálja a vontatási áramok (felsővezeték, sín, földvisszavezetés) által létrehozott mágneses mezőt. A kompenzálás mértéke attól függ, hogy mekkora áram képes folyni a köpenyben, hiszen a kompenzáló hatást a köpenyáram mágneses tere váltja ki. Ez a mágneses tér az $I_{köpeny}$ áramerősség növekedésével szintén növekszik, ennek hatására az U_{ind} feszültség csökken.



2. Kép | Indukálás fizikája vasúti környezetben

2.1.1 Kábel védőtényező

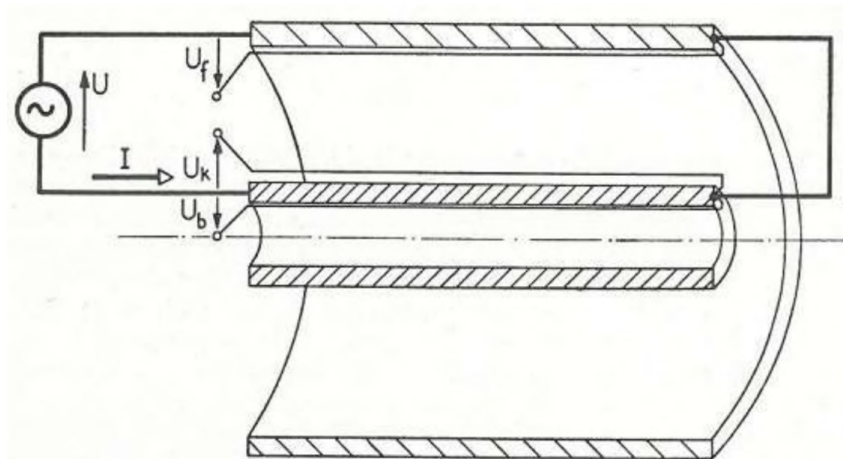
Az árnyékolás hatásosságát a kábel védőtényezője adja meg. Kétféle védőtényező értékről beszélhetünk kábelek esetén, az egyik a belső (transzverzális) védőtényező, a másik a beépítés utáni védőtényező. Általánosan a védőtényező definíció szerint:

$$k = \frac{U}{U_0} [-]$$

- U [V] azon hosszirányú feszültség, mely a kábelér-föld hurokban a köpeny jelenléte nélkül indukálódik
- U_0 [V] azon hosszirányú feszültség, mely a kábelér-föld hurokban a köpeny jelenlétével indukálódik

A védőtényező így mértékegység nélküli arányszám. Értéke 0 és 1 közötti, ahol a 0 a teljes kompenzálást (tökéletes árnyékolás), míg az 1 az árnyékolás nélküli esetet jelenti. A védőtényező komplex szám, de a gyakorlatban az abszolút értéke releváns.

A méréshez a következő egyenértékű áramkört használtuk, itt jól láthatók a különböző feszültségértékek:



3. Kép | Köpeny-föld áramkör

2.1.2 Belső (transzverzális) védőtényező

Belső védőtényező alatt a még be nem épített, laboratóriumi körülmények között mért kábel által nyújtott védőtényezőt értjük. A belső védőtényező definíció szerint:

$$k_b = \frac{U_b}{U_k} = \frac{Z_b}{Z_k} [-]$$

- U_b [V] a köpeny belső felületén mérhető felületi feszültség
- Z_b [$\frac{\Omega}{km}$] a köpeny belső felületi impedanciája
- U_k [V] a köpeny külső felületén mérhető felületi feszültség

- $Z_k \left[\frac{\Omega}{km} \right]$ a köpeny külső felületi impedanciája

A védőtényező nagysága több dologtól is függ, ferromágneses anyagból készült köpennyel rendelkező kábelek esetén erősen nemlineáris jellegű, így csak méréssel lehet meghatározni. Jó védőhatás jó vezetőképeségű anyagból készült áryékolás és nagy impedanciájú páncéllal érhető el.

2.1.3 Köpeny-föld hurok impedanciát figyelembe vevő védőtényező

A kábel beépítéskor a védőtényező kialakításában fontos szerepet játszik a köpeny-föld hurok impedancia Z_E , mellyel tovább pontosíthatjuk a laboratóriumi méréseink során kapott eredményeinket. Ennek kiszámításház a Carson-Clem összefüggést használhatjuk:

$$Z_E = 9,9 \cdot 10^{-4} + j \cdot \omega \cdot 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{659 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{d} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

- $R_f = 9,9 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$, talaj ellenállása
- $f [Hz]$ a frekvencia
- $\rho [\Omega m]$ a talaj fajlagos ellenállása

Ennek a módszernek jelentős limitációja a ρ értéke, hiszen ez erősen talajfüggő. Pontos értéket akkor kapunk, ha a beépítés helyszíne és a jellemző talaj fajlagos ellenállás ismert. [1]

A Z_E külső impedancia segítségével pontosított kábel védőtényező a következőképp számítható:

$$k_E = \frac{Z_b}{Z_k + Z_E} [-]$$

2.2 Köpenyjellemzők szerepe a védőtényező kialakításában [2]

Jelen mérésünk során meghatározó tényező volt a feszültségek helyes értelmezése és mérése. A következőkben bemutatjuk, hogy az egyes köpenyjellemzők meghatározása milyen összefüggések szerint történik.

2.2.1 Belső felületi impedancia

Definíció szerint a belső felületi impedancia értéke egyenlő a belső felületi feszültség és az áram hányadosával. Ennek abszolút értéke:

$$|Z_b| = \frac{|U_b|}{|I|}$$

dimenziója $\frac{\Omega}{km}$. A belső felületi feszültség a 3. kép szerinti elrendezésben a belső felületi vezeték és a kábelköpeny között mérhetjük. Az impedancia szöge pedig a belső felületi

feszültség és a köpenyáram közötti szög. A belső felületi impedancia értéke kis frekvencián közelíthető a köpeny mért egyenáramú ellenállásával, vagyis:

$$Z_b \cong R_b \cong R_{DC}$$

A frekvencia növekedésével a skin-hatás miatt a belső felületi áramsűrűség csökken és késő jellegűvé válik, ezért a belső felületi impedancia abszolút értéke az egyenáramú ellenállásnál is kisebb értékre csökken és kis negatív (késő jellegű) szöge lesz.

2.2.2 Külső felületi impedancia

Definíció szerint a külső felületi impedancia értéke egyenlő a külső felületi feszültség és az áram hányadosával. Ennek abszolút értéke:

$$|Z_k| = \frac{|U_k|}{|I|}$$

dimenziója $\frac{\Omega}{km}$. A külső felületi impedancia értéke kis frekvencián közelíthető a köpeny egyenáramú ellenállásával és a páncélból származó impedanciával:

$$Z_k \cong R_{DC} + R_{pancel} + X_{pancel}$$

Az impedancia szöge pedig a külső felületi feszültség és a köpenyáram közötti szög. A páncélból származó impedancia valós része, R_{pancel} a páncélban kialakult örvényáramok veszteségét képezi le, miközben a meddő része, X_{pancel} a páncélon belüli jelentős induktív reaktanciát. A reaktancia értéke a relatív permeabilitás miatt jelentős nagyságú. Az impedancia mindkét összetevője növekszik a páncél telítődésének eléréséig. Így levonhatjuk a következtetést, a külső felületi impedancia értéke nemlineáris kapcsolatban áll az áram nagyságával.

$$X_{pancel} = j\omega L [\Omega]$$

Ez a plusz induktivitás nagyon hatásos a a kábelköteg és köpeny között megmaradó feszültség csökkentésére. Az impedanciák szöge az adott felületi feszültség és köpenyáram által bezárt szög.

2.2.3 Árnyékolás szerepe

A rézhuzalkoszorú árnyékolás alapvetően a villamos tér ellen árnyékol [3]. A réz árnyékolásnak konstans impedanciája van az áram függvényében. A réz kis fajlagos ellenállása hozzájárul ahhoz, hogy nagyobb kompenzáló áram alakuljon ki a kábel köpenyében.

2.2.4 Páncél szerepe

Az acélpáncél a mágneses tér elleni árnyékolást adja [3]. A ferromágneses acél páncél indukció-térerősség összefüggése erősen nemlineáris, így az impedancia értéke áramfüggő, nemlineáris. Az indukció-térerősség függést a relatív permeabilitás jellemzi. Így látható, hogy a nemlineáris impedancia a páncél ferromágneses mivoltából származik. Emiatt méréssel kell meghatározni a páncél impedanciát az áram függvényében, amiből így a védőtényező is mérhető, számítható lesz.

2.3 Relatív permeabilitás hatása a védőtényező értékére

2.3.1 Relatív permeabilitás meghatározása

A mágneses indukció értéke függ a teret kitöltő anyagtól. Ennek jellemzésére szolgál a permeabilitás. A permeabilitás két tényezőből áll:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \left[\frac{H}{m} \right]$$

- $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \left[\frac{H}{m} \right]$ a vákuum permeabilitása
- $\mu_r [-]$ a relatív permeabilitás

A vákuum permeabilitás értéke állandó. A relatív permeabilitás egy arányszám. Megmutatja, hogy a teret kitöltő anyag mennyivel jobban vezeti a mágneses fluxust, vagyis, hogy az adott H térerősség mellett mekkora a B fluxussűrűség egy anyagban a vákuumhoz képest [4]. Dolgozatunk során a kábel páncélját alkotó acél relatív permeabilitásának meghatározásával foglalkoztunk. A páncél induktivitása és relatív permeabilitása közt a következő összefüggés írható fel: [5]:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r A N^2}{l} [H]$$

- $A [m^2]$ a tekercs keresztmetszete
- $N [db]$ a tekercs menetszáma, a mi esetünkben $N = 1$
- $l [m]$ a tekercs hossza

Az induktivitás csak a geometriai tényezőktől és a permeabilitás értékétől függ. Mivel $X_{pnc} = j\omega L = \frac{U}{I}$, ebből következik, hogy a relatív permeabilitás értéke a következő módon számítható:

$$\mu_r = \frac{U}{j\omega I \mu_0 A} [-]$$

A relatív permeabilitás értéke egy komplex szám. Ezért modulusát és fázisszögét megfelelő méréssel kell meghatározni.

2.3.2 Relatív permeabilitás áramfüggése

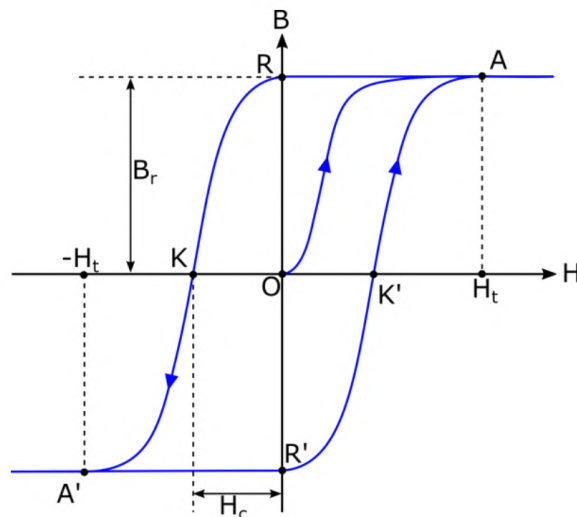
A ferromágneses anyagok mágneses szempontból sok mikroszkopikus részre osztoznak. Ezeket domainelemeknek nevezzük.

Alapállapotban a domainelemek az energiaminimum elve szerint ellentétes pólussal kapcsolódnak, és az anyag teljes egészét tekintve makroszkopikusan nem mágnesesedik.

Ha az anyagot mágneses térbe helyezzük, akkor azok a domainelemek lesznek stabilak, amelyek ugyanolyan irányítással rendelkeznek, mint a mágneses mező. Instabilak azok a domainelemek, amelyek pont ellentétes pólussal rendelkeznek. Ezek a legkisebb energiájú állapot elérése érdekében egy adott mágneses térerősség hatására átfordulnak. Ekkor a domainfal más helyre kerül, a stabil domainelemek növekedni kezdenek.

A mágnesezés első szakaszában a domainfalak gyorsan mozognak, hiszen ezen mozgások kis energiabefektetéssel megvalósíthatók, emiatt gyorsan változik a mágnesezettség. A mágneses térerősség további növelésével a domainfalak mozgása egyre gátoltabb lesz, hiszen egyre több domainfal ütközik kristályhibába. Ennek hatására a mágnesezettség növekedése lassul.

Ha minden domain a mágneses térrel azonos irányban áll, a mágnesezettség telítődésbe ér. [6]



4. Kép | Hiszterézis görbe [6]

A relatív permeabilitás mágnesezési görbéje:

- $B_r [T]$ remanens indukció
- $H_c [\frac{A}{m}]$ koercitív erő

A relatív permeabilitást az első mágnesezési görbéből kapjuk. Mivel $B = \mu H$, a relatív permeabilitás a görbe meredeksége lesz. Így az első mágnesezési görbe deriváltjából látszik, hogy a relatív permeabilitásnak van egy maximum értéke, amit a görbe dinamikusan változó középső részén ér el.

Mivel a mágneses térerősség áramfüggő, így a relatív permeabilitás értéke is függ az áramtól. Méghozzá az áram növelésével, először rohamosan növekszik, amíg eléri maximumát, majd elkezd csökkenni. A relatív permeabilitás hatása a külső felületi impedanciára, azt eredményezi, hogy relatív permeabilitás és a védőtényező között fordított arányosság áll fenn, tehát a védőtényező értékének lesz egy minimum értéke.

3 Védőtényező mérés

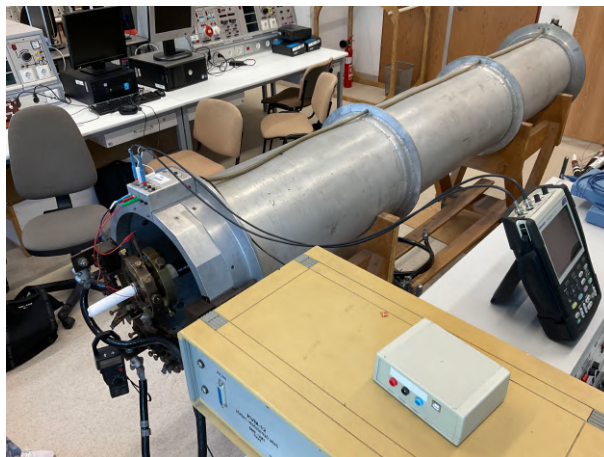
3.1 Mérés célja

Gyakorlati tapasztalat alapján a kábelek belső védőtényező értéke adott esetekben nagy szórást mutat. A mérés célja a dolgozatunkban vizsgált vasúti vonalkábelek belső védőtényezőjének meghatározása laboratóriumi körülmények között, két különböző gyártmányú vonalkábel belső védőtényező értékeinek összehasonlítása és az eltérés okainak feltárása.

3.2 Mérési elrendezés

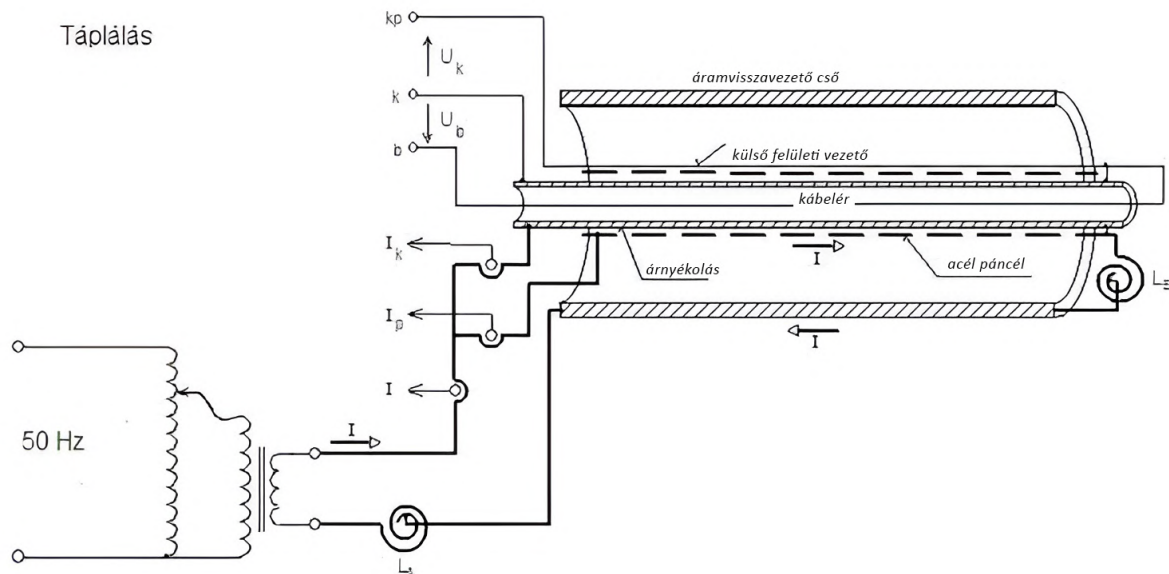
3.2.1 Földvisszavezetési impedancia leképezése

Laboratóriumi mérések elvégzéséhez elengedhetetlen a valóság minél pontosabb és minél egyszerűbb modellezése. Carson-Clem szerint a végtelen távoli földvisszavezetést egy egyenértékű, koaxiális visszavezető csővel képeztük le. A V1 épület 4. emeleti Smart Grid laboratóriumában rendelkezésre áll egy ennek megfelelően kialakított visszavezető cső. Maga a mérési módszer a Tanszéken született, amely bekerült a *CCITT Directives Volume IX.* kötetébe is.



5. Kép | Egyenértékű koaxiális visszavezető cső

A mérési elrendezést a következő ábra mutatja be:



6. Kép | Mérési elrendezés

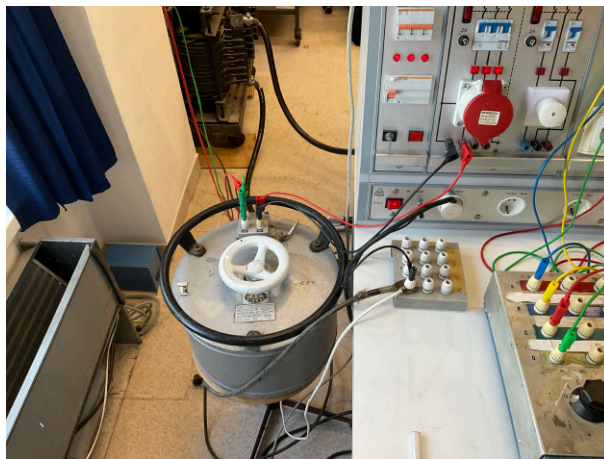
Jelen mérésünk során a visszavezető cső közepén (a koaxiális elrendezés biztosítása érdekében) helyeztük el a vizsgálni kívánt kábeleket. Így a koaxiális visszavezető cső megfelelő árnyékolást jelentett a külső zavaró villamos terek ellen. Mivel a kábel pontosan középen van, egyenlő távolságra a koaxiális visszavezető cső pontjaitól, emiatt szimmetrikus, egyenletes lesz az árameloszlás, nem lép fel zavaró közelségi hatás sem a kábel árnyékolásában folyó áram tekintetében [7]. A mérés során a frekvencia végig 50 Hz . A mérendő kábelminta-darab mindkét végén lépcsőzetesen le van csupaszítva úgy, hogy a PE burkolat megmaradó hossza $3,10\text{ m}$, ezt követően a páncél megmaradó hossza $3,20\text{ m}$, a köpeny megmaradó hossza $3,32\text{ m}$ és végül az erek kb. 30 cm hosszú szakasza lett lecsupaszítva. A köpennyel érintkező feszültségsondák távolsága $3,22\text{ m}$, ami egyben a mérési hosszt is meghatározza (a hosszegységre jutó mennyiségek meghatározásakor ezzel a hosszal mindig vissza kell osztani).

3.2.2 Indukáló hatás leképezése

A 2. fejezetben részletezett, vonalkábeleket érő indukáló hatást fordított módon hoztuk létre. A kábel köpenyén közvetlenül áthajtjuk az $I_{\text{köpeny}}$ áramot, amelyet a valóságban a villamos vontatási rendszer által létrehozott elektromotoros erő hajtana át a végpontokon földelt (így zárt) köpenyen. A köpenyen áthajtott áramot a visszavezető csővön keresztül vezetjük vissza a forráshoz.

3.2.3 Mérés felépítése

A mérőáram létrehozásához egy toroid transzformátort (7. kép) és egy hagyományos transzformátort (8. kép) használtunk. A toroid transzformátorral, változtatható menetszámának köszönhetően, tudtuk beállítani a kívánt áramértéket, a hagyományos transzformátor pedig biztosította a méréshez szükséges törpefeszültség létrehozását.

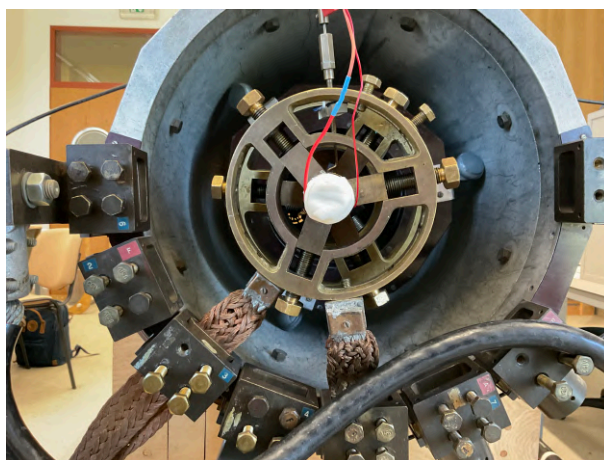


7. Kép | Toroid transzformátor



8. Kép | Transzformátor

A transzformátor szekunder oldalának egyik pólusához egy speciális, erre a célra kialakított réz gyűrű segítségével, párhuzamos kapcsolással csatlakoztattuk a mérendő kábel pán-célját és árnyékolását.

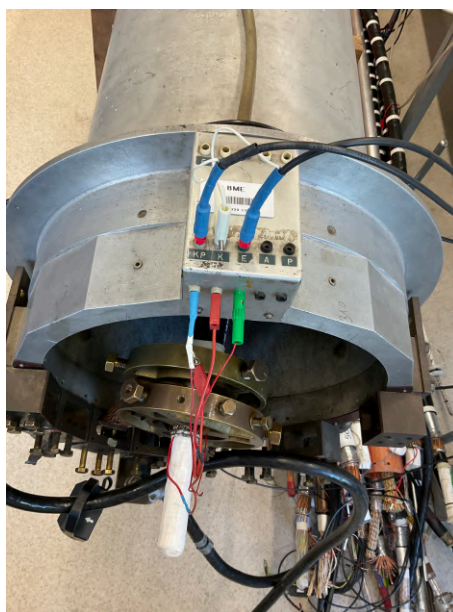


9. Kép | Rézgyűrű

A koaxilás visszavezető cső végén a páncélt és az árnyékolást ismét a rézgyűrűk (9. kép) segítségével párhuzamosan kapcsoltuk, majd a rézgyűrű és a visszavezető cső között is galvanikus összeköttetést alakítottunk ki, ezzel megteremtve az áramvisszavezetést. A koaxiális visszavezető cső tápláláshoz közelebbi oldalát a transzformátor szekunder oldalának másik pólusához csatlakoztattuk, ezzel zárva az áramkört.

3.2.4 Feszültségmérés

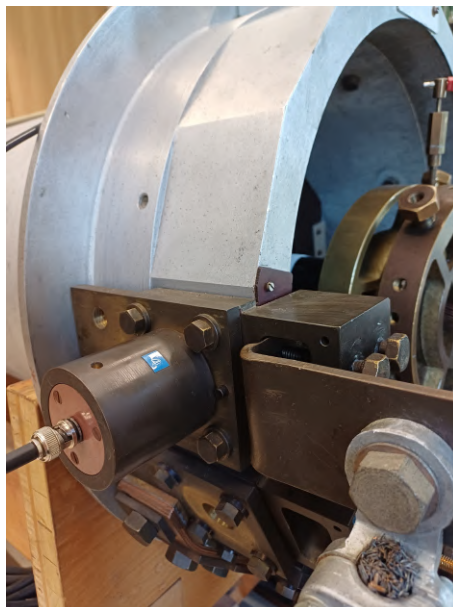
A belső védőtényező megállapításához mértük a külső (U_k) és belső (U_b) felületi feszültségeket. Ehhez a köpeny külső és belső felületén egy-egy felületi vezetőt vezettünk végig. Ezen vezetők a kábel, betáplálástól távolabbi felén galvanikus csatlakozásban állnak, így ott azonos potenciálon vannak. Feszültségmérést a két felületi vezető, betápláláshoz közelebbi végén tudunk végezni. Itt egy közös referencia ponthoz képest mértük mind a külső, mind a belső felületi feszültség értékét (lásd 6. kép „k” pontja).



10. Kép | felületi vezetők kivezetése a mérési pontnál

3.2.5 Árammérés

Az áramerősséget egy induktív csatolással érzékelő speciális árammérő fejjel (11. kép) mértük. Ez a mérőfej egy az áramerősséggel és az áram által létrehozott indukció differenciáhányadosával arányos feszültség jelet ad. Ezt a jelet egy integráló erősítővel tovább erősítettük, majd értékét és jelalakját egy PicoScope® 4262 digitális oszcilloszkóppal mértük. Így a mért jel már az árammal arányos feszültség érték volt.



11. Kép | felületi vezetők kivezetése a mérési pontnál

Az áramerősséget 3 helyen mértük:

- Teljes mérőáram: $I_{össz}$
- Páncélban folyó áram: $I_{páncél}$
- Árnyékolásban folyó áram: $I_{árnyék}$

1. Táblázat | Áramméréshez használt műszerek

	Gyártó	Típus	Jellemzők
Oscilloszkóp Erősítő	Picoscope BME-VMT	4262 KVM-12	2 csatorna, 16 bit felbontás Változtatható erősítés

A 2. fejezetben említettek alapján a ferromágneses anyagok relatív permeabilitása és ezzel impedanciája függ a vezetett áram erősségétől. Emiatt méréseinket minden esetben az áramerősség függvényében végeztük. A mérőáramot 10 A és 150 A között 10 A -es lépésekkel állítottuk. A gyakorlatban a vontatási áram nagysága alapján és a vasút-kábel elrendezéséből adódóan a vonalkábel árnyékolásában kialakuló áram $10 - 40\text{ A}$ tartományba esik. Emiatt a vonalkábel köpenyének ebben az intervallumban kell a lehető legjobb védőtényezőt biztosítania.

3.2.6 Fáziszög-mérés

Az áram és feszültség nullátmenete közti időbeli különbséget a φ fáziszöggel jellemezhetjük. Ennek megállapításához minden munkapontban rögzítettük az áramerősséget és a feszültségértékeket illetve a két jel jelalakjának leírását. Ezt az oszcilloszkóphoz tartozó PicoScope 7 program segítségével tudtuk megtenni.

A fáziszög megállapításában nehézséget okoz, hogy a feszültség jelalakja, az áramerősség növekedésével, egyre jobban veszít szinuszos jellegéből. Emiatt nem közvetlenül összemérhető az áram szabályos szinuszos jelalakjával.

A probléma feloldására a torzult feszültség jelet annak alapharmonikus szinuszos jelével helyettesítettük Fourier-transzformáció után. Az alapharmonikust egy *Matlab* kód segítségével állítottuk elő. Az így előállított jel már összevethető az áram jelalakjával, és a fázisszög számítható.

3.3 Mért értékek, eredmények

A méréseket, ahogy korábbiakban is említettük, két különböző kábelon végeztük. A kábelek alapvető adatai a következő táblázatban láthatók.

2. Táblázat | Vizsgált kábelek adatai

Kábel adatok		
Jelölés	Típus	Mért hossz [m]
A	Vasúti vonalkábel, B9	3,1
B	Vasúti vonalkábel, B9	3,1

3.3.1 Mért értékek, eredmények

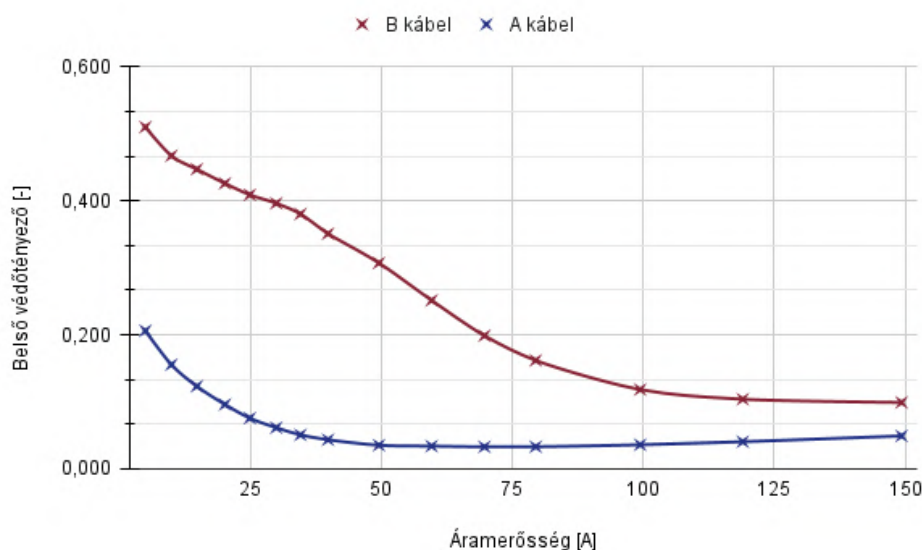
A fenti mérési elrendezés és mérési elvek alapján mért és számítás útján kapott eredményeket az alábbi táblázatokban és grafikonokon tüntettük fel.

3. Táblázat | Védőtényező - „A” kábel

Mért értékek			Impedanciák			Belső védőtényező		
$I [A]$	$U_{belső} [mV]$	$U_{kúlsó} [mV]$	$Z_b [\frac{\Omega}{km}]$	$\varphi_{Z_b} [^\circ]$	$Z_k [\frac{\Omega}{km}]$	$\varphi_{Z_k} [^\circ]$	$k_{belső} [-]$	$\varphi_{k_{belső}} [^\circ]$
5.09	2.73	13.24	0.17	-9.67	0.84	59.22	0.206	-68.90
10.05	5.22	33.55	0.17	-12.52	1.08	57.90	0.156	-70.42
15.15	7.61	61.7	0.16	-14.38	1.31	55.16	0.123	-69.54
20.25	9.6	99.86	0.15	-15.76	1.59	51.60	0.096	-67.36
25.31	11.45	151.15	0.15	-16.58	1.93	46.83	0.076	-63.41
30.2	13	211.32	0.14	-17.31	2.26	42.80	0.062	-60.11
34.95	14.42	283.94	0.13	-17.53	2.62	38.97	0.051	-56.50
39.93	15.79	362.68	0.13	-17.92	2.93	36.39	0.044	-54.31
49.94	18.06	511.26	0.12	-17.94	3.30	34.28	0.035	-52.22
59.75	21.78	640.4	0.12	-18.70	3.46	34.28	0.034	-52.98
69.88	24.81	753.26	0.11	-19.13	3.48	35.17	0.033	-54.30
79.61	27.76	839.01	0.11	-19.45	3.40	36.32	0.033	-55.77
99.86	35.77	993.92	0.12	-20.37	3.21	39.48	0.036	-59.85
119.93	44.8	1104.63	0.12	-20.85	2.97	42.74	0.041	-63.59
149.71	60.36	1227.31	0.13	-20.67	2.64	46.92	0.049	-67.59

4. Táblázat | Védőtényező - „B” kábel

Mért értékek			Impedanciák				Belső védőtényező	
$I [A]$	$U_{belso} [mV]$	$U_{kulso} [mV]$	$Z_b [\frac{\Omega}{km}]$	$\varphi_{Z_b} [^\circ]$	$Z_k [\frac{\Omega}{km}]$	$\varphi_{Z_k} [^\circ]$	$k_{belso} [-]$	$\varphi_{k_{belso}} [^\circ]$
5.01	3.24	6.35	0,21	-5,22	0,41	54,01	0,510	-59,23
9.97	6.17	13.2	0,20	-6,74	0,43	54,41	0,467	-61,14
14.82	9.13	20.41	0,20	-6,55	0,44	54,48	0,447	-61,02
20.19	12.35	28.98	0,20	-6,60	0,46	54,66	0,426	-61,26
24.94	15.17	37.08	0,20	-6,64	0,48	54,90	0,409	-61,55
29.98	18.18	45.85	0,20	-6,71	0,49	55,24	0,397	-61,95
34.6	21.32	56.04	0,20	-6,84	0,52	55,23	0,380	-62,06
39.86	24.09	68.61	0,20	-7,04	0,56	55,10	0,351	-62,14
49.58	30.11	97.97	0,20	-7,40	0,64	54,26	0,307	-61,67
59.63	35.65	141.73	0,19	-7,84	0,77	52,20	0,252	-60,04
69.71	41.27	207.54	0,19	-8,35	0,96	48,77	0,199	-57,12
79.49	46.03	284.31	0,19	-8,86	1,15	45,76	0,162	-54,61
99.44	56.19	474.41	0,18	-9,58	1,54	42,47	0,118	-52,04
119.01	66.84	642.6	0,18	-10,01	1,74	42,46	0,104	-52,47
149.31	83.76	844.74	0,18	-10,36	1,83	44,42	0,099	-54,78



1. Grafikon | Védőtényező értékek összehasonlítása

3.4 Kiértékelés

A 3. és 4. táblázatokból és a 1. grafikonból is egyértelműen leolvasható, hogy a B kábel védőtényezője sokkal rosszabb, mint az A kábelé. A védőtényező ideális értéke, a vontatási áramokhoz tartozó kábel árnyékolás áram üzemi tartományában ($10 - 50A$), $k_{belso} < 0,1$.

Az elméleti bevezetésben részletezték alapján, a páncél mágneses tulajdonságai miatt a védőtényező értéke egy bizonyos áramerősségnél minimális. Ezt a minimumot elérve az érték növekedni kezd. Gyakorlati felhasználás szempontjából a védőtényező minimumának a már említett vasúti alkalmazás szerinti $10 - 50A$ tartományba kellene esnie. Ezt a kritériumot az A kábel teljesíti, azonban a B kábel védőtényezője még $150A$ áramerősségnél sem érte el a minimumát.

További méréseink és vizsgálataink során arra kerestük a választ, hogy mi okozhatja ezt a jelentős eltérést két, ránézésre és felépítésre azonos kábel között.

4 A páncél és árnyékolás szerepe

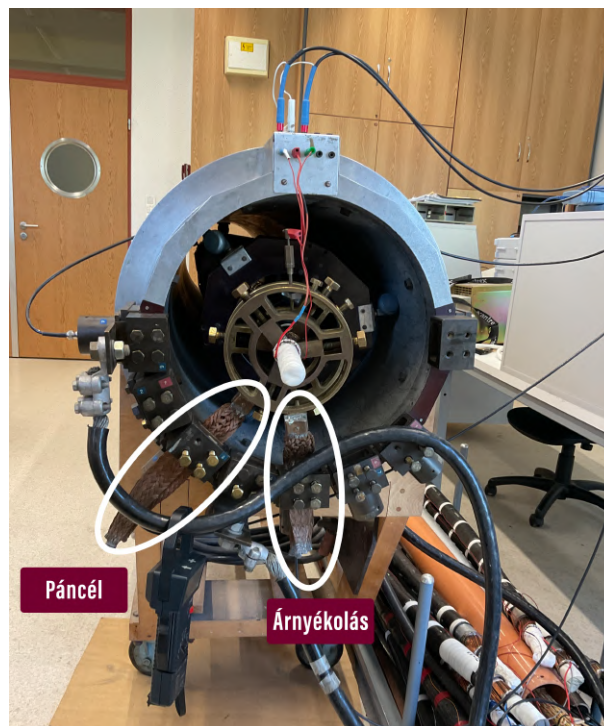
Jelen mérésünk során arra kerestük a választ, hogy a vonalkábelek köpenyét alkotó páncél és árnyékolás milyen mértékben járul hozzá a belső védőtényező kialakításához. Ezt a mérést csak a *B* kábelben végeztük el. Azonban a megállapított tendenciák bármely kábel esetén megállják a helyüket.

A mérés során két, gyakorlatban is előforduló szituációt modelleztünk. A vizsgált kábeleket 500 méteres hosszban gyártják, emiatt beépítéskor óhatatlanul *folytonosítani* kell őket. Ez a folytonosítás alapvetően rossz hatással van a védőtényező értékére, hiszen kötési ellenállások, folytonosítási hibák miatt növekedhet a köpeny belső felületi impedanciáj, amely így a védőtényezőt jelentősen rontja. Célunk az volt, hogy kiderítsük melyik elem (*árnyékolás* vagy *páncél*) folytonosítási hibája van negatívabb következménnyel a védőtényezőre.

A mérés összegzéseként következtetéseket vontunk le és javaslatokat fogalmaztunk meg a kábel beépítésével kapcsolatban.

4.1 Mérési elrendezés

A mérést az előzőekben ismertetett elrendezés szerint végeztük, azzal a különbséggel, hogy ebben az esetben egyszerre csak az egyik rétegen (árnyékolás vagy páncél) vezettünk áramot. Ezt a megfelelő mérőfej (12. kép) kicsavarásával tudtuk elérni, hiszen ezek a mérésen túl az adott elem áramkörbe való csatlakozásáért is felelősek. Ezzel az elrendezéssel külön-külön vizsgálni tudtuk az egyes rétegek által nyújtott védőtényező értékét, ugyanis a két réteg (árnyékolás és páncél) között szigetelő réteg található a kábelben.



12. Kép | Árnyékolás és páncél kiiktatása az áramkörből

Ezekben az esetekben egy egyszerűsített mérési eljárást alkalmaztunk, csak a következő

értékeket mértük:

- Teljes mérőáram: $I_{össz}$
- Árnyékoláson vagy páncélban folyó áram: $I_{árnyek}$ vagy $I_{páncél}$
- Külső felületi feszültség: U_{kulso}
- Belső felületi feszültség: U_{belso}

Az áram és feszültség közti szögmérést ebben az esetben elhagytuk, mert számunkra csak a védőtényező abszolút értéke volt fontos.

4.2 Áramvezetés csak az árnyékoláson

Az első esetben csak az árnyékoláson vezettünk áramot, ezzel modellezve egy olyan szituációt, amikor beépítési hiba miatt a páncél folytonosítása nem tökéletes vagy egyáltalán nem folytonos.

5. Táblázat | Árnyékolás mérési eredmények

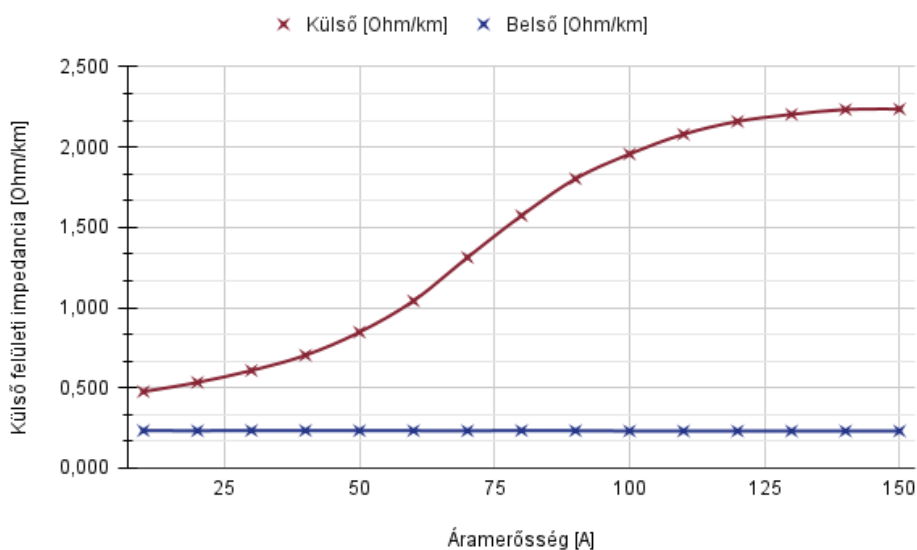
$I_{árnyek}[A]$	$U_{belso}[mV]$	$U_{kulso}[mV]$	$Z_{belso}[\frac{\Omega}{km}]$	$Z_{kulso}[\frac{\Omega}{km}]$	$k_{belso}[-]$
10.5	7.6	15.5	0.233	0.476	0.490
20.64	14.9	34.2	0.232	0.533	0.435
30.6	22.2	57.7	0.233	0.607	0.384
40.8	29.6	89	0.233	0.702	0.332
50.6	36.6	133	0.232	0.846	0.275
60.2	43.6	195	0.232	1.041	0.223
71	51.3	290	0.232	1.312	0.176
80.3	58.2	392	0.233	1.572	0.148
90	65.1	504	0.232	1.802	0.129
101.3	72.6	615	0.230	1.956	0.118
111.5	79.9	720	0.230	2.079	0.110
120.8	86.5	810	0.230	2.159	0.106
130	93.1	890	0.230	2.203	0.104
139.8	100.2	970	0.230	2.233	0.103
149.7	107.3	1040	0.230	2.236	0.103

A 2. grafikonon látható, hogy a belső felületi impedancia értéke közel állandó. Ez, az elméleti bevezetőben is tárgyaltak alapján a réz *impedancia - áramerősség* függvényének tulajdonságai miatt alakul így.

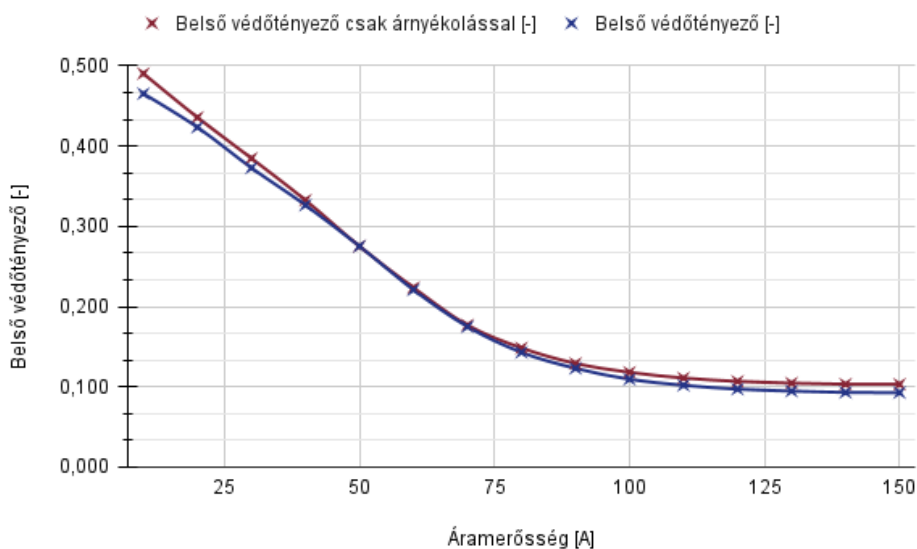
A külső felületi impedancia értéke azonban növekvő tendenciát mutat. Erre az acél páncél jelenléte adja a választ. Bár a páncél galvanikusan nem része az áramkörnek, azonban a réz árnyékoláson és a koaxiális visszavezető csövön folyó áram miatt gerjesztve van, így befolyásolja a külső felületi impedancia értékét.

A páncél jelenléte a Z_{kulso} befolyásolása miatt közvetlen kihatással van a k_{belso} védőtényező értékére is. Emiatt ez a mérési elrendezés nem alkalmas a csak árnyékolás által biztosított védőtényező érték számítására, azonban megfelelően modellez egy olyan gyakorlati esetet, amikor a páncélban szakadás vagy kötési ellenállás található.

A 5. táblázatból és a 3. grafikonról is leolvasható, hogy a védőtényező értékét az, hogy csak az árnyékoláson folyik áram, jelentősen nem befolyásolja.



2. Grafikon | Felületi impedancia értékek



3. Grafikon | Védőtényező értékek

4.3 Áramvezetés csak a páncélon

A második esetben csak a páncélon vezettünk áramot, ezzel modellezve egy olyan szituációt, amikor beépítési hiba miatt az árnyékolás folytonosítása nem tökéletes vagy nem folytonos.

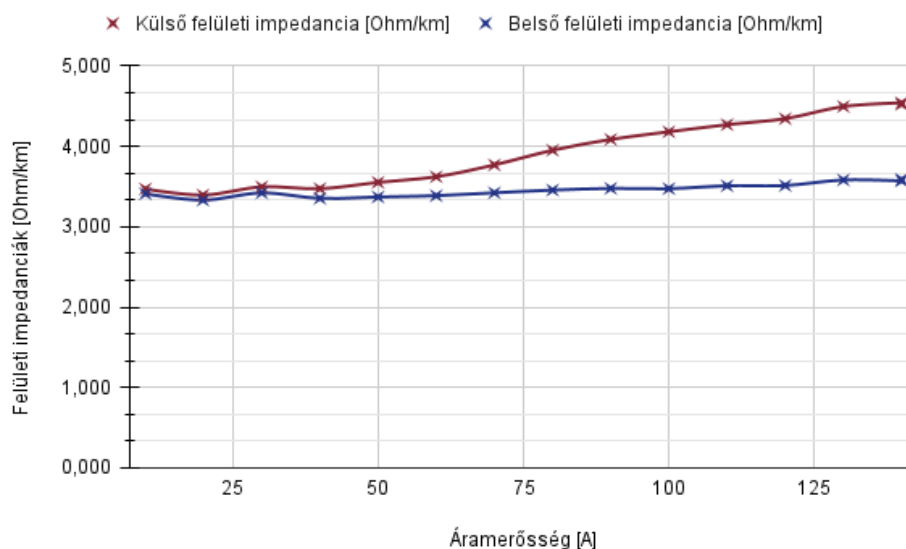
6. Táblázat | Páncél mérési eredmények

$I_{páncél}[A]$	$U_{belső}[mV]$	$U_{külső}[mV]$	$Z_{belső}[\frac{\Omega}{km}]$	$Z_{külső}[\frac{\Omega}{km}]$	$k_{belső}[-]$
10.32	109.1	111	3.410	3.470	0.983
20.53	212	216	3.331	3.394	0.981
30.08	319	326	3.421	3.496	0.979
40.12	417	432	3.353	3.473	0.965
51.5	538	567	3.370	3.552	0.949
60.3	633	677	3.386	3.622	0.935
70.7	750	826	3.422	3.769	0.908
80	857	980	3.456	3.952	0.874
90	970	1140	3.477	4.086	0.851
100.3	1080	1300	3.473	4.181	0.831
110.3	1200	1460	3.509	4.270	0.822
120.3	1310	1620	3.513	4.344	0.809
130.6	1450	1820	3.581	4.495	0.797
140	1550	1970	3.571	4.539	0.787
141.2	1570	1980	3.587	4.523	0.793

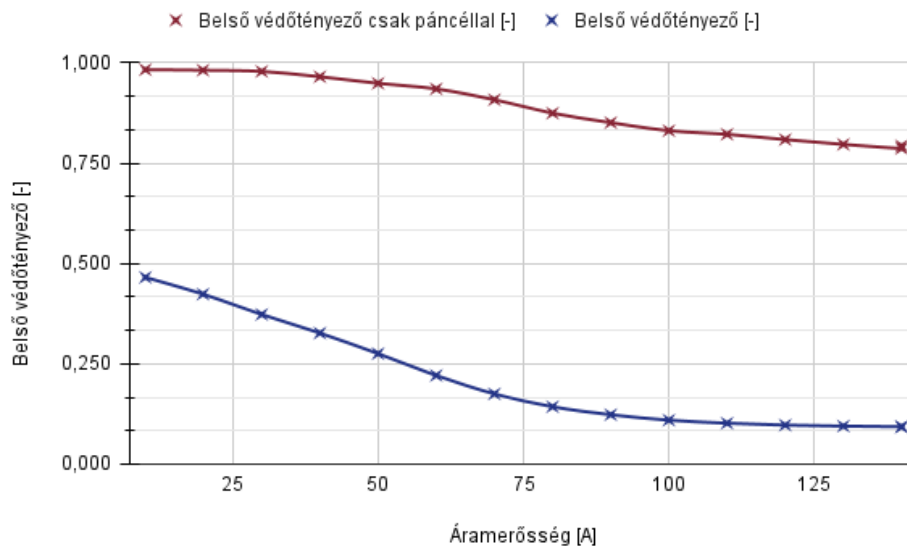
A 4. grafikonon látható, hogy mind a külső, mind a belső felületi impedancia értéke jelentősen megnövekedett a 2. grafikonon található értékekkel szemben. Ez az acél nagyobb fajlagos ellenállása miatt van így.

A külső felületi impedancia értéke itt is növekvő tendenciát mutat. Ez szintén az acél páncél változó mágneses permeabilitásának köszönhető.

A 6. táblázatból és a 5. grafikonról is leolvasható, hogy a védőtényező értékét az, hogy csak a páncélon folyik áram, jelentősen befolyásolja.



4. Grafikon | Felületi impedancia értékek



5. Grafikon | Védőtényező értékek - áramvezetés a páncélon

4.4 Kiértékelés

Méréseink alapján megállapítható, hogy a kábel beépítésekor az árnyékolás pontos, megfelelő folytonosítása kardinális kérdés, jelentősen befolyásolja a kábel köpenye által nyújtott védőtényező értékét. Ezzel szemben a páncél folytonosítása másodlagos szempont, hiszen ahogy méréseinkből is kiderül egy-egy szakadás, nagyobb kötési ellenállás által okozott áramcsökkenés a páncélban nem okoz jelentős eltérést a kábel védőtényezőjében.

Ez a megállapítás újdonság az iparágban, mivel eddig a gyakorlatban mind az árnyékolás, mind a páncél folytonosításának tökéletesítésére törekedtek. Ez fontos megállapítás a gyakorlat számára, mivel a páncél sokszor kadmiumos bevonattal készül, amelynek vilamos szempontú folytonosítása nem problémamentes és a helyszínen sokszor sem idő, sem technológia nem áll rendelkezésre a megfelelő kivitelezésre. Ezzel szemben a rézhuzal koszorú árnyékolás folytonosítása technológiai szempontból lényegesen egyszerűbb.

5 Relatív permeabilitás mérés

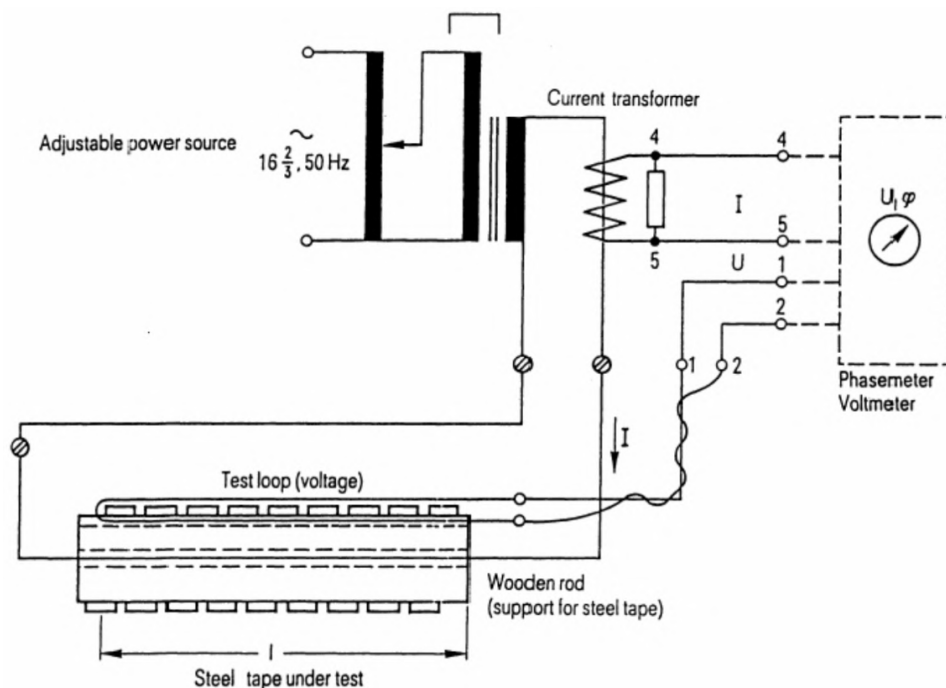
5.1 Mérés célja

A mérés során ismét az A és a B kábelek páncélját hasonlítottuk össze, ezúttal a mágneses tulajdonságaikat vizsgáltuk. Ahogy az elméleti bevezetőben is említettük, a páncél relatív permeabilitása is alapvetően befolyásolja a kábel védőtényezőjét. A mérés célja az volt, hogy kiderítsük, van-e jelentős különbség a két kábel páncéljának relatív permeabilitása között.

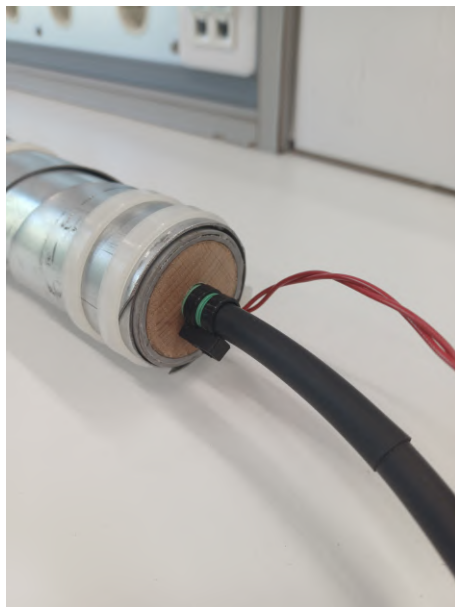
5.2 Mérési elrendezés

5.2.1 Mérés felépítése, páncél előkészítése

A relatív permeabilitás méréséhez a *CCITT Directives Volume IX*. [1] által leírtaknak megfelelő mérési elrendezést használtuk. (13. kép) A kábeleken lévő páncélzat egy részét kibontottuk. A vizsgálandó acélszalagokat egy fa henger köré tekertük, aminek a közepén vezettük át az $I_{magnesezesi}$ áramot szolgáltató vezetőt.



13. Kép | Relatív permeabilitás sematikus mérési elrendezés [1]

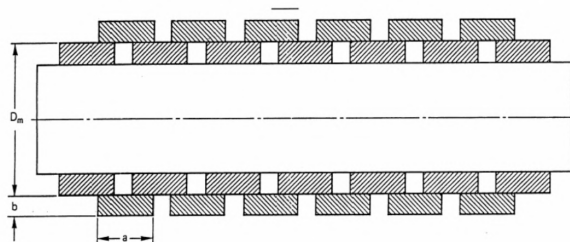


14. Kép | Fa hengeren lévő páncél

Az adott páncélra jellemző keresztmetszet és az elméleti bevezetőben tárgyaltak szerint a relatív permeabilitás értéke a következő:

$$\mu_r = \frac{U}{j\omega I \mu_0 \frac{Q_{FE}}{\pi D_m}} [-]$$

- $Q_{FE} [m^2]$ a szalagpáncél effektív keresztmetszete egységnyi hosszra vetítve
- $D_m [m]$ az acélpáncél átlagos átmérője



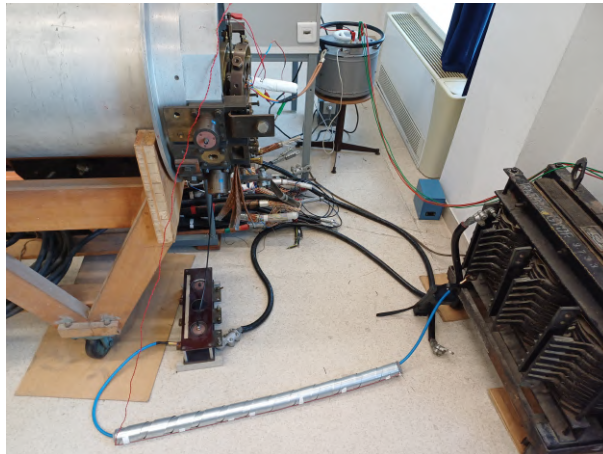
15. Kép | Páncél metszet [1]

A metszeten jelölt a , b és D_m paramétereket tolómérővel mértük. Szükségünk volt még arra, hogy hány menetes az adott szakaszon a szalagpáncél (n). Ehhez lemértük a teljes hosszt és a menethosszt, ezek hányadosából a menetszám számítható. Ezekből az értékekből már számolható volt a szalagpáncél effektív keresztmetszete egységnyi hosszra: $Q_{FE} = a \cdot b \cdot n$.

A védőtényező méréshez hasonlóan egy toroid transzformátort (7. kép) és egy hagyományos transzformátort (8. kép) használtunk fel.

7. Táblázat | Páncélzatok adatai a két kábel (A és B) esetén

Geometriai adatok		
	A	B
D_m [mm]	45	46.65
a [mm]	50	60
b [mm]	1	1.4
Menethossz [mm]	80.5	98.5
Teljes hossz [mm]	1000	610
n [db]	12.42	6.19
Q_{FE} [mm ²]	621.12	520.20



16. Kép | Relatív permeabilitás mérési elrendezés

5.2.2 Feszültségmérés

A mágneses fluxus nagyságát a vizsgált acélszalagok körül elhelyezett mérőhurok (felületi vezetők) segítségével mértük. Ehhez mértük a hurokban indukálódott feszültséget (U_{hurok}) és ennek fázisszögét (φ) a mágnesezési áram (I_{be}) függvényében. Ehhez egy vezetőt vezetünk végig, egyik irányba a fa és a páncélzat között, másik irányba pedig a páncélzat külső felületén. Ez adta az U_{hurok} nagyságát. A szögek mérése a 3.2.6. fejezetben leírt módon történt.

5.2.3 Árammérés

Az árammérést egy hordozható árammérőfej segítségével határoztuk meg. A hordozható árammérőfejet sorosan kötöttük az elrendezésbe. Az acél páncél telítődése miatt a relatív permeabilitás erősen függ a mágneses térerősségtől. Így a mérést a mágneses tér teljes tartományán kell elvégezni. Emiatt a mérőáramot 10 A – 150 A nagyságrendben állítottuk be összhangban a kábel védőtényező mérésével.

5.3 Mért értékek, eredmények

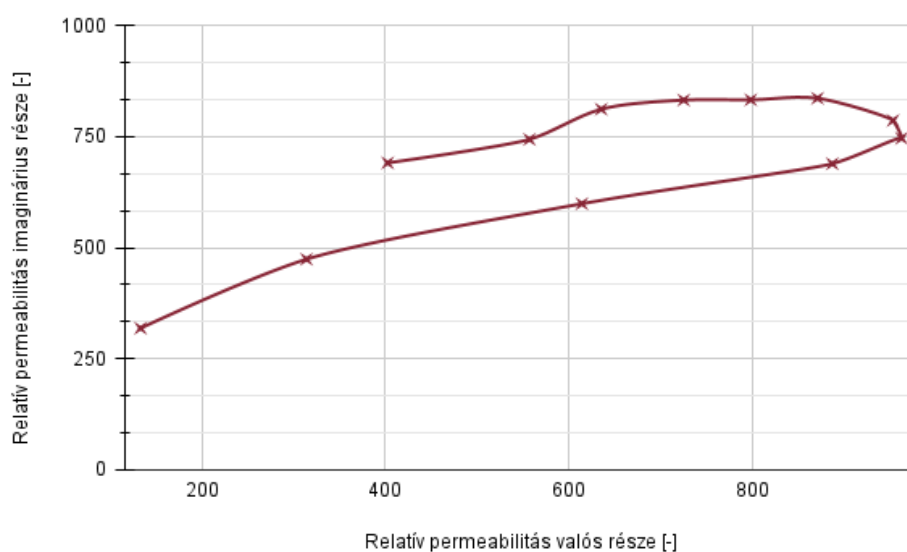
A mért és számított eredményeket az alábbi táblázatokban és grafikonokon tüntettük fel.

8. Táblázat | Relatív permeabilitás - „A” páncél

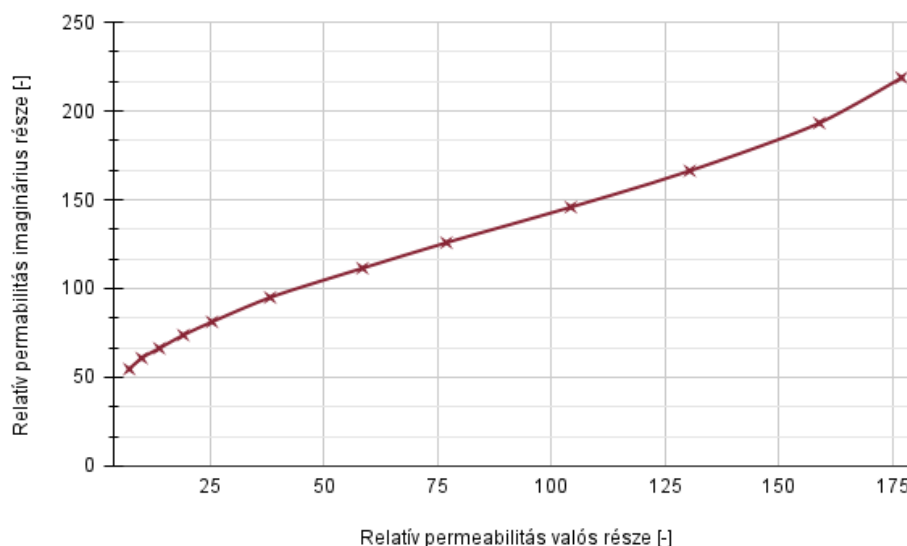
Mért értékek			Relatív permeabilitás		
$I_{be}[A]$	$U_{hurok}[mV]$	$\varphi[^\circ]$	$ \mu [-]$	$\mu_{im}[-]$	$\mu_{re}[-]$
10.27	12.30	67.35	345.25	318.62	132.96
20.50	40.42	56.48	568.38	473.86	313.88
29.66	88.24	44.27	857.62	598.65	614.10
40.72	158.64	37.82	1123.06	688.64	887.15
50.04	211.39	37.77	1217.77	745.88	962.62
59.84	256.47	39.50	1235.50	785.88	953.34
70.53	295.36	43.82	1207.19	835.85	871.01
79.92	319.73	46.20	1153.26	832.38	798.22
88.70	339.54	48.92	1103.48	831.80	725.11
101.13	361.47	51.94	1030.36	811.27	635.21
119.87	386.26	53.16	928.90	743.41	556.95
149.06	413.25	59.77	799.19	690.51	402.37

9. Táblázat | Relatív permeabilitás - „B” páncél

Mért értékek			Relatív permeabilitás		
$I_{be}[A]$	$U_{hurok}[mV]$	$\varphi[^\circ]$	$ \mu [-]$	$\mu_{im}[-]$	$\mu_{re}[-]$
9.81	1.51	82.51	55.10	54.63	7.18
19.84	3.43	80.76	61.62	60.82	9.90
29.47	5.59	78.27	67.72	66.31	13.77
40.39	8.62	75.51	76.17	73.74	19.06
48.95	11.67	72.64	85.10	81.22	25.38
61.25	17.57	68.11	102.34	94.96	38.16
71.10	25.08	62.32	125.84	111.44	58.46
80.61	33.32	58.56	147.48	125.82	76.93
90.74	45.59	54.43	179.28	145.82	104.28
102.68	60.82	51.89	211.35	166.29	130.45
121.89	85.47	50.56	250.20	193.22	158.95
149.88	118.21	51.02	281.43	218.77	177.04



6. Grafikon | „A” páncél relatív permeabilitása



7. Grafikon | „B” páncél relatív permeabilitása

5.4 Kiértékelés

A 2. fejezetben tárgyalt összefüggések alapján elmondható, minél nagyobb a páncél relatív permeabilitása, annál jobb védőtényezővel rendelkezik az adott kábel. A 8. és 9. táblázatokból és 6. és 7. grafikonokból megfigyelhető, hogy a két páncél relatív permeabilitás értékei között jelentős eltérés van. Az *A* kábel páncélja egy nagyságrenddel nagyobb értékeket ad, méghozzá a már tárgyalt legkritikusabb tartományon, a $10A - 50A$ között. Míg a *B* páncél relatív permeabilitása nem éri el a maximumot $150A$ -nél sem. Kijelenthetjük, hogy a védőtényező és a relatív permeabilitás mérések összhangban vannak, a relatív permeabilitás mérések is alátámasztják a védőtényező mérés során kapott eredményeket.

A 6. és 7. grafikonokon a relatív permeabilitást $\mu = \mu_{Re} + j\mu_{Im}$ valós (x tengely) és imaginárius (y tengely) részekre bontva ábrázoltuk. Minden pont egy adott áramértékhez tartozó permeabilitásnak felel meg. Ezen ábrázolásmódnak az előnye az, hogy jól látható rajta az a pont, ahol a relatív permeabilitásnak maximuma van.

Dolgozatunk során tovább vizsgáldtunk hogy pontosan mi okozhatja a két kábel páncéljának eltérő permeabilitás értékeit.

6 Anyagtechnológiai kitekintés

6.1 Vizsgálatok célja

Ahogy az előzőekben is láthattuk, a két vizsgált kábel tulajdonságai között igen jelentős eltérések mutatkoztak. Ennek oka, ahogy a relatív permeabilitás mérésből is kiderült, alapvetően a két páncél relatív permeabilitásának jelentős eltérése. Vizsgálataink során arra kerestük a választ, hogy ezt az eltérést milyen anyagtechnológiai tulajdonságok okozhatják, milyen gyártástechnológiai megoldásokkal lehet segíteni a megfelelő páncél kialakítását.

6.2 Vizsgálatok folyamata

A fémek összetételének és szövetszerkezetének vizsgálata nem egyszerű folyamat, nincs egy fajta mérési módszer, mely biztosan jó eredményt szolgáltat. Ezért kutatásunk során törekedtünk a probléma sokoldalú megközelítésére, több mérési módszert is alkalmaztunk.

Minták előkészítése [8]

Első lépésben méretre vágtuk a mintákat. Mindkét kábel páncéljából rendelkezésünkre állt a vizsgálathoz hasznosítható szakasz. Ezekből megfelelő méretű minta darabokat vágtunk le. Az acél darabok vágásánál különös figyelmet kell fordítani arra, hogy a vizsgálni kívánt minta ne melegedjen túlzottan fel, hiszen ez a szövetszerkezetet befolyásolná.



17. Kép | Páncél minták (fent B, lent A)

Második lépésben az így elkészített minta darabokat gyantába foglaltuk. Ez biztosította, hogy az egyébként meglehetősen kicsi minták adott pozícióban rögzüljenek, és később további méréseket lehessen rajtuk végrehajtani.

Harmadik lépésben az így elkészült mintákat még további előkészítő eljárásoknak kell alávetni. A cél, hogy a fémek felületéről minden felületi hiba eltávolításra kerüljön. Ehhez első körben egy többlépéses csiszolást majd egy két lépéses polírozást használtunk. Így elérve azt, hogy a minta vizsgált oldalának felületi érdessége a lehető legkisebb legyen.

Utolsó lépésként a láthatóvá tettük az acél szövetelemeinek határát. Ezt egy speciális marószerszám, 2 %-os nitál-etanol oldat használatával, 5 – 10 másodperces behatási idővel értük el. A nitál bizonyos fázisokat old, másokat nem, így láthatóvá téve ezek határait.

Keménységmérés

A keménységmérés az egyik legalapvetőbb, gyors, roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer, eredményeiből következtethetünk a vizsgált acél szövetszerkezetére, hőkezelésére, gyártási technológiájára.

Mérseink során a keménységmérést egy statikus keménységmérési módszerrel, az ún. Vickers-eljárással mértük. A Vickers-eljárás szűrőszerszáma egy gyémántgúla, amelynek lapszöge 136° -os. [9] A mérést egy digitális mikrokeménységmérővel végeztük, melynek adatai a 10. táblázatban láthatók. Mikrokeménységmérő használata a mintánk mérete miatt volt indokolt.

10. Táblázat | Keménységmérő adatai

Típus	Test load
Buehler Indentamet 1100	0,3 – 30 kg

Optikai mikroszkópos vizsgálat

A szövetszerkezet-vizsgálatot egy optikai mikroszkóppal végeztük, melynek adatai a 11. táblázatban láthatók. A mikroszkópos szövetszerkezet vizsgálat során, a marással előkészített mintákat vizsgáltuk. A már megmárt mintát mikroszkóp alatt, megfelelő nagyítással vizsgálva, láthatóvá válnak a szövetszerkezeti mintázatok, amelyekből következtetni lehet az acél alakítására, hőkezelési eljárására.

11. Táblázat | Optikai mikroszkóp adatai

Típus	Nagyítás
Olympus PMG-3	1000x

Elektronmikroszkópos vizsgálat

Elektronmikroszkópot elsősorban a vele egybeépített *röntgenspektrométer* miatt használtunk, mely képes energia-diszperzív anyagmeghatározásra (*Energy Dispersive Spectroscopy EDS*).

Ha az atomokat nagy energiájú elektronokkal bombázzuk, a beérkező elektronok képesek az adott atom héjairól egy-egy elektron leszakítására. Ha ez egy belső héjon történik, akkor a szabad helyre, az energiaminimumra való törekvés miatt, egy külső héj elektronja kerül. Ez energialeadással jár, mely γ foton formájában történik. Ezen γ foton energiája minden atom esetében egyedi. Következésképpen, ha a γ foton energiáját, vagy bármely ezzel összefüggő tulajdonságát mérjük, az atom beazonosítható.

A mérés során elsősorban a páncél bevonatának anyagára voltunk kíváncsiak, azonban az acél pontos összetételéről is képet kaptunk.

12. Táblázat | Elektronmikroszkóp adatai

Típus	Felbontás	Egyéb
ZEISS EVO MA 10	3 nm	EDS

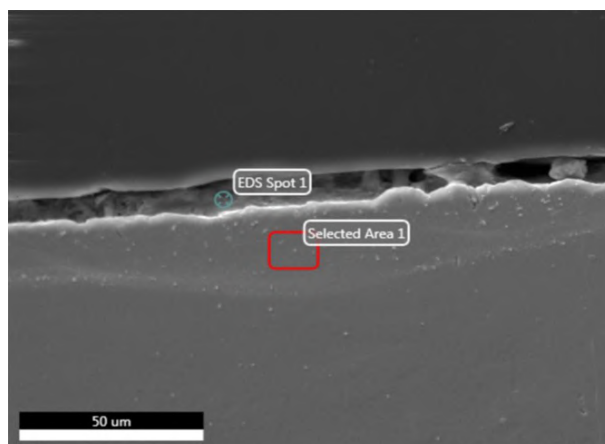
6.3 Eredmények kiértékelése

Elektronmikroszkópos anyagvizsgálat

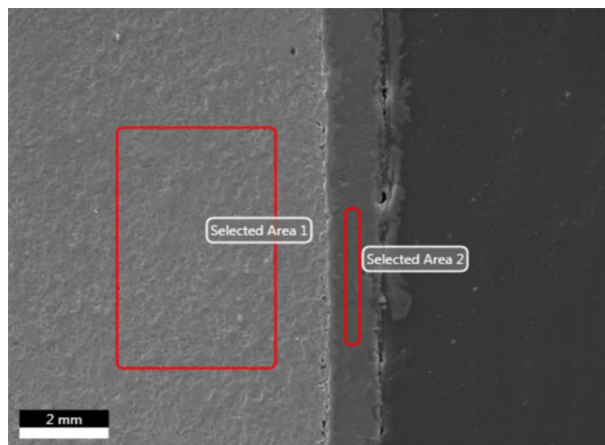
Képek

A 18. képen az A minta, míg a 19. képen a B minta elektronmikroszkópos képe látható. A képen jól látható a minta szerkezeti felépítése, balról jobbra, illetve alulról felfelé, az első az acél test, a páncél fő alkotója, a második a bevonat (ennek a felső része az A minta esetében kitörött, ezért látható ott mélyedés), a harmadik pedig a befoglaló gyanta.

A 18. képen egy pirossal és egy zölddel jelölt terület is látható, (Selected Area 1, EDS Spot 2), míg a 19. képen két pirossal jelölt terület is látható, (Selected Area 1, Selected Area 2), ezek jelölik az EDS vizsgálat célterületét.



18. Kép | „A” minta elektronmikroszkópos képe - bevonat

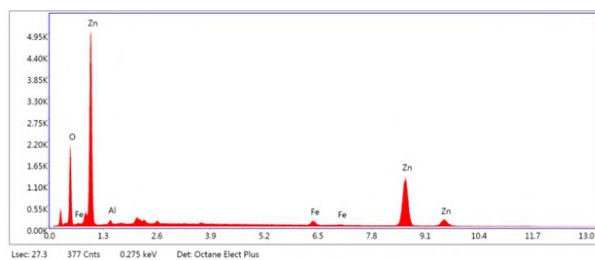


19. Kép | „B” minta elektronmikroszkópos képel - bevonat

Az acélok anyagösszetételére a már részletezett EDS méréssel kaptunk eredményt.

Bevonat

Ahogy említettük korábban is, a bevonat összetételét az *EDS Spot 1* és *Selected Area 2* területen vizsgáltuk. A mérés eredményei a következő diagramokon és táblázatokban látható.

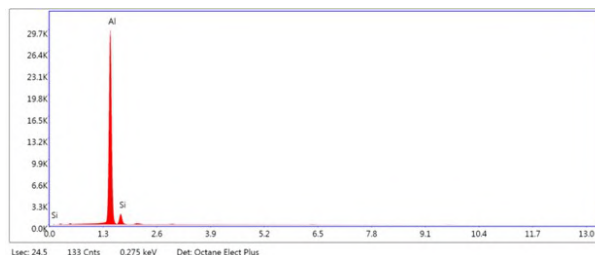


8. Grafikon | „A” minta EDS vizsgálati eredményei - bevonat

13. Táblázat | „A” minta EDS vizsgálati eredményei - bevonat

Elem	Tömeg %	Atom %
O	21.1	51.7
Al	0.9	1.3
Fe	2.3	1.6
Zn	75.5	45.4

A 8. grafikon és a 13. táblázat adataiból jól látszik, hogy az A kábel páncélja egy galvanizált, cink bevonattal ellátott páncél.



9. Grafikon | „B” minta EDS vizsgálati eredményei

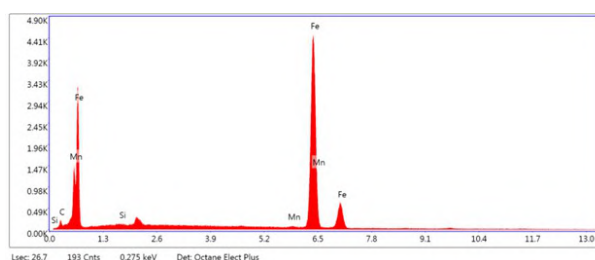
14. Táblázat | „B” minta EDS vizsgálati eredményei

Elem	Tömeg %	Atom %
Al	87	87.5
Si	13	12.5

A 9. grafikon és a 14. táblázat adataiból jól látszik, hogy az B kábel páncélja nagyrészt alumínium bevonattal van ellátva.

Acél

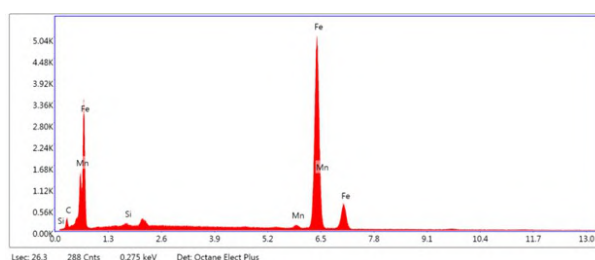
A bevonat vizsgálata után megmértük az acél pontos összetételét is, a *Selected Area 1* területeken.



10. Grafikon | „A” minta EDS vizsgálati eredményei - acél

15. Táblázat | „A” minta EDS vizsgálati eredményei - acél

Elem	Tömeg %	Atom %
C	3.8	15.5
Si	0.2	0.3
Mn	0.5	0.4
Fe	95.6	83.8



11. Grafikon | „B” minta EDS vizsgálati eredményei - acél

16. Táblázat | „B” minta EDS vizsgálati eredményei - acél

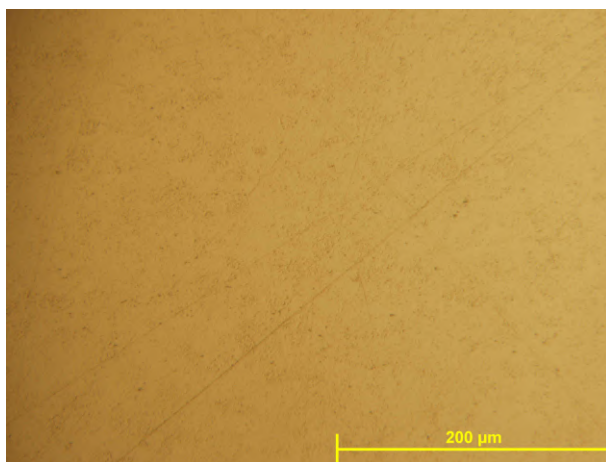
Elem	Tömeg %	Atom %
C	5.8	22.3
Si	0.4	0.7
Mn	1	0.8
Fe	92.8	76.2

Az acél összetételeért vizsgálatából alapvetően 2 fontos konklúzió vonható le:

- Mindkét anyag *közönséges* szénacél, különleges ötvözőelemek nélkül.
- A két anyag, felépítését tekintve, közel azonosnak mondható

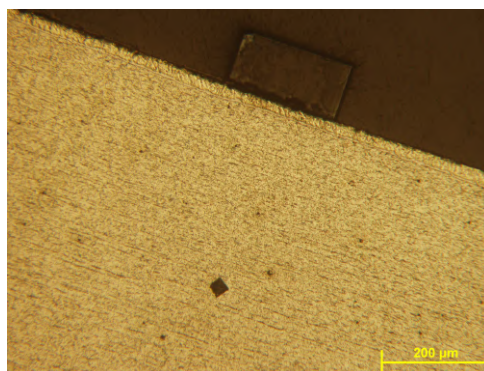
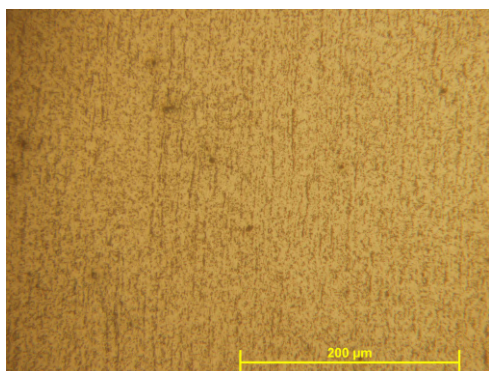
Ezek alapján az eltérő mágneses tulajdonságaik nem az ötvözetbeli eltérésnek köszönhetőek, hanem a szövetszerkezeti és keménységbeli különbségeknek. További méréseinkben ezeket tárjuk fel.

Optikai mikroszkópos vizsgálat



20. Kép | „A” minta optikai mikroszkópos képe

A 20. képen egy ferrites szövetszerkezet látható, aminek nincs "irányultsága", illetve nagyobb ferrit fázisok figyelhetők meg benne. Ez utóbbi kettő tulajdonság illetve a páncél szalag jellege arra enged következtetni, hogy a hideg hengerlés után a már hengerelt acél lemezt valamilyen hőkezelési eljárásnak vetették alá.



21. Kép | „B” minta optikai mikroszkópos képe 22. Kép | „B” minta optikai mikroszkópos képe II.

A 21. képen szintén egy ferrites szövetszerkezet látható, azonban ebben a mintában a szemcsék orientációja már látványos, a mintával párhuzamosan vannak megnyúlva (22. kép). Ebből arra lehet következtetni, hogy az acélon, hideghengerlés után, további eljárásokat már nem alkalmaztak.

Keménységmérés

17. Táblázat | Keménységmérés eredményei

Anyag	Eredmény
A	104HV
B	165HV

A mért értékekből egyértelműen megállapítható, hogy az *A* minta *puhább*, mint a *B* minta. Ez az eredmény jól magyarázható az előzőekben látott optikai mikroszkópos vizsgálat eredményeivel. A hidegalakítás, hideghengerlés keményebb acélt eredményez mint a melegalakítás, vagy a hidegalakítás utáni hőkezelés.

6.4 Kiértékelés

6.4.1 Acél mágneses permeabilitása

Összegezve a mérések eredményeit, elmondható, hogy az *A* és *B* minta eltérő relatív permeabilitásáért elsősorban a minták eltérő szövetszerkezete és keménysége a felelős. Hiszen, az acélok keménységértéke és relatív permeabilitása értéke között összefüggés áll fent. [10] [11]

A hidegalakított, kemény acélban jelentős belső feszültségek ébrednek, melyek nehezítik a domain mozgásokat. A domain mozgások leírásához alkalmazott koercitív erő ezzel megnő. A koercitív erő és a relatív permeabilitás közti fordított arányosság miatt a relatív permeabilitása az ilyen anyagoknak kicsi lesz. [12] [13]

Ezzel szemben a melegalakítás, vagy utólagos hőkezelés képes csökkenteni a belső feszültségeket, diszlokációsűrűséget. Ennek következtében a domain mozgások könnyebben, kisebb energiabefektetéssel tudnak megvalósulni. A koercitív erő csökken.

A szövetszerkezetek mikroszkópos vizsgálata és keménységmérése után pedig elmondható, hogy a szövetszerkezetekbeli különbséget a gyártástechnológiák közti különbség idézi elő.

6.4.2 Bevonat tulajdonságai

A páncélok bevonata, felületkezelése az *A* páncél esetében horganyzás, cinkkel való bevonás, a második esetben pedig alumíniummal való bevonás.

Szabad levegőn, az alumíniummal megvalósított felületkezelés ellenállóbb, mint a cinkkel bevont, galvanizált acél. [14]

Vizes környezetben, a talaj is ilyennek tekinthető, az alumíniumot a savak és a gyenge bázisok is hamar korrodálják, egyedül a pH 4 – 8 tartományban ad megfelelő védelmet. [14] Bár a talaj jellemző pH értéke ebben a tartományban mozog [15], savas eső hatására a pH érték csökkenhet [16]. Illetve egyéb tényezők miatt is előfordulhat ettől eltérő pH érték. [17] Ezzel szemben a cink ellenállóbbnak mutatkozik, és teljes pH tartományban megfelelő védelmet nyújt. [14]

Továbbá megállapítható, hogy a B páncél az alumíniummal bevont lemezből, valószínűleg utólagos darabolással került kialakításra – erre utal a B páncél széleknél megfigyelhető jelentős korróziója. Ilyen esetben a vágási élknél bevonat nélküli felület alakul ki, amely nem védett korrózió ellen. Megjegyezzük, hogy mindkét kábelminta gyári dobról került mintavételre, azaz gyári állapotúak.

7 Konklúzió

A dolgozatunk olyan témakört ismertet, amely a villamos vontatásnál alkalmazott vonalkábelek példáján keresztül ismerteti a kábelvédőtényező fogalmát, mérési módszerét, két mért kábelminta esetében. Betekintést ad a védőtényezőre kihatással lévő páncél és árnyékolás fontosságára. Új eredményként megállapítást tettünk az árnyékolás folytonosítás relatív fontosságára a páncéléval szemben. Külön foglalkoztunk a páncél relatív permeabilitás mérésével és az értékelésével két mintadarab esetén. A villamos mérések mellett anyagtechnológiai szempontból is vizsgáltuk a relatív permeabilitás kérdéskörét és fontos megállapításokat fogalmaztunk meg a mérési eredmények alapján. A nemzetközi szakirodalomban is kevés irodalom foglalkozik ezen témakör ilyen formán való kezelésével.

A témakör önmagában eléggé komplex – ez látható az elméleti ismeretek fejezetből és a mérési feladatokból is. Sikerült ebben az összetett témakörben az elméleti ismeretek mellett szerteágazó mérési tapasztalatot szerezni a laboratóriumi mérésekben, külön kiemelve az ötletként behozott anyagtechnológiai aspektust.

8 Felhasznált irodalom

Hivatkozások

- [1] International Telecommunication Union. *ITU - CCITT - DIRECTIVES - Volume IX*. 1989.
- [2] BME VET. *Elektromágneses összeférhetőség (EMC) - Kábel védőtényező vizsgálata - Hallgatói segédlet*.
- [3] Dieter Stoll. *EMC elektromágneses zavarvédelem*. Műszaki Könyvkiadó, 1980.
- [4] The Academy of EMC. *Material properties*. URL: https://www.academyofemc.com/material-properties#google_vignette.
- [5] Kádár István. *IV. A mágneses tér alapfogalmai, alaptörvényei, mágeneses körök*. 2021.
- [6] Ruff Benedek. *Lágymágneses anyagok hiszterézisgörbéjének vizsgálata*. 2019. URL: <https://dsp.mit.bme.hu/userfiles/szakdolgozat/ruffszakdolgozat19.pdf>.
- [7] Szedlák Roland. *EMC demonstrációs eszköz fejlesztése hallgatói laboratóriumi méréshez*. 2019.
- [8] BME ATT. *Mikroszkópia segédlet*. URL: https://att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTBEA1/segedletek/Mikroszkopia_segedlet.pdf.
- [9] BME ATT. *Melegalakítás, keménységmérés segédlet*. URL: https://att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTBEA1/segedletek/Melegalakitas_kemenyseghmeres_segedlet.pdf.
- [10] N. Karimian és tsai. "Differential permeability behaviour of P9 and T22 power station Steels". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 352 (2014), 81–90. old. ISSN: 0304-8853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.09.059>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030488531300718X>.
- [11] Lei Zhou és tsai. *Magnetic NDT for Steel Microstructure Characterisation – Modelling the Effect of Ferrite Grain Size on Magnetic Properties*. 2016. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:174781851>.
- [12] Yu Zhang és tsai. "A Study on the Relationship between Hardness and Magnetic Properties of Ultra-High Strength Steel". *Innovative Research in Hot Stamping Technology*. 1063. köt. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2015. jan., 78–81. old. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1063.78](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1063.78).
- [13] F. Ito és tsai. "Relationship between magnetic properties and hardness on recovery and recrystallization process in cold rolled steel". *2015 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG)*. 2015, 1–1. old. DOI: [10.1109/INTMAG.2015.7157159](https://doi.org/10.1109/INTMAG.2015.7157159).
- [14] Zaki Ahmad. "CHAPTER 7 - COATINGS". *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Szerk. Zaki Ahmad. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006, 382–437. old. ISBN: 978-0-7506-5924-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-075065924-6/50008-8>.
- [15] MTA ATK TAKI. *Magyarországi talajok kémhatása- és mészállapota*. URL: <https://agro.bio.hu/images/images/2048x2048/40625726354b8f317be707.jpg>.
- [16] E. Mueller. "The Effect of Acid Rain on Soil Nutrient Levels and Plant Growth." *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2018, ED41D–1217.

- [17] Alastair Fitter és Robert Hay. 6 - *Toxicity*. Szerk. Alastair Fitter és Robert Hay. Third Edition. London: Academic Press, 2002, 241–284. old. ISBN: 978-0-12-257766-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-054981-1.50011-0>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080549811500110>.