

Elektromotor tekercs vezetékek összehasonlító elemzése

Pup Dániel*, Dr. Czinege Imre**

*Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutató Központ; e-mail: pupd@sze.hu).

** Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutató Központ (e-mail:czinege@sze.hu

Kivonat: A járműiparban alkalmazott elektromotorok tekercseinek gyártásánál felmerült a réz mellett egyéb alternatív vezeték anyagok alkalmazásának a szükségessége. Erre legalkalmasabbak az alumínium vezetékek, melyek tulajdonságai részben kedvezőtlenebbek, részben kedvezőbbek, mint a réz vezetéké. A két vezetékanyag összehasonlítása alapvető fizikai paraméterek, optimális tömeg, többparaméteres elemzés és a hőtechnikai tulajdonságok alapján valósult meg. Az elemzések azt mutatták, hogy egyes területeken az alumínium vezetékek előnyösebb tulajdonságokat mutatnak, tehát alternatív alkalmazásként számításba jöhetnek.

1. BEVEZETÉS

A járműipar minden ága szerkezetváltás folyamatában van, melynek során a belsőégésű motorok alkalmazását fokozatosan felváltják a hibrid vagy tisztán elektromos meghajtású járművek. Mértékadó előrejelzések szerint a benzines és dízel üzemanyagú belsőégésű motorral hajtott gépjárművek kibocsátása a 2020-2030-as időszakban tetőzik, majd utána fokozatos csökkenés áll be, és helyüket átveszik a hibrid és elektromos járművek. Ezen szempontok indokolják a járművekben alkalmazott elektromotorok vezeték anyagainak kiemelt kutatását is, melynek anyagtudományi vonzataival foglalkozik ez a cikk. A kutatásnak három fő célja van az alternatív vezető anyagok tekintetében, ezek a motorok hatásfokának javítása, tömegcsökkentés és a gazdaságossági szempontok.

Az általános gyakorlat szerint a két leggyakrabban használt vezető anyag a réz és alumínium. Mivel a réz fajlagos ellenállása közelítően 60%-a az alumínium vezetőknek, ezért gyors összehasonlításra a réz tűnik kedvezőbbnek. Ugyanakkor a komplex értékelés más tulajdonságokra is kiterjed, melynek során az elektromotorok esetében mérlegelni kell a hőtágulási és hővezetési tényezőt, fajhőt, sűrűséget, szilárdságot és tekercselhetőséget is. Mindezen szempontokat első közelítésre a technikai tisztaságú rézre és alumíniumra végezzük el, majd az elemzést az alumínium ötvözeteire is kiterjesztjük. Ugyanis ötvözéssel az alumínium szilárdsága javítható, ugyanakkor az ötvözők a fajlagos ellenállást növelik, tehát már e két tulajdonság esetében is ellentétes szempontok mérlegelése merül fel. További elemzést érdemel a sűrűségekben mutatkozó különbség, mely azonos ellenállású vezetékek esetében az alumínium javára mutat előnyt. A továbbiakban ezeket a szempontokat fogjuk elemezni.

2. A RÉZ ÉS ALUMÍNÍUM VEZETŐK GLOBÁLIS ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A két vezeték típus összehasonlításával több elemzés foglalkozik, ezek közül Dong Angelia (2015), Yanniello, B. (2006) valamint Jablonski és szerzőtársai (2009) munkáját említ az irodalomjegyzék. Emellett például az alumíniummal és rézzel foglalkozó szakmai szervezetek (például Aluminum.Org is közölnek összehasonlításokat, de ezek a mögöttük álló ipari lobbik miatt nem tekinthetők tárgyilagosnak.

A réz és alumínium színtémek alapvető tulajdonságait az 1. táblázat hasonlítja össze. Ebből látható, hogy a réz javára komoly előny a vezetőképességben és szilárdságban jelentkezik, ugyanakkor az alumínium sűrűsége mindössze harmada a rézének, amely komoly tömegcsökkentési potenciált jelez.

1. táblázat: Tulajdonságok összehasonlítása

Jellemző	Mértékegység	Al	Cu	Cu/Al
Fajlagos ellenállás	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,028	0,017	0,61
Hőtágulási együttható	$\text{mm}/(\text{mC}^\circ)$	23,8	16,6	0,70
Hővezetési tényező	$\text{W}/(\text{mC}^\circ)$	226	402	1,78
Fajhő	$\text{cal}/(\text{gC}^\circ)$	0,214	0,092	2,30
Sűrűség	g/cm^3	2,703	8,920	3,30
Szakítószilárdság	MPa	120	260	2,17

A tömegcsökkentés lehetőségének számszerű jellemzése a tömegarányokkal adható meg. Legyen a vezetékek hossza és ellenállása azonos, ekkor felírható az ellenállások egyenlősége:

$$R = \rho_{Al} \cdot \frac{l}{A_{Al}} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{A_{Cu}} \text{ ebből } \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} = \frac{A_{Al}}{A_{Cu}} \quad (1)$$

A tömegek aránya ebből kifejezve:

$$\frac{m_{Al}}{m_{Cu}} = \frac{d_{Al} \cdot l \cdot \rho_{Al}}{d_{Cu} \cdot l \cdot \rho_{Cu}} = \frac{2,702 \cdot 0,0283}{8,920 \cdot 0,0172} = 0,507 \quad (2)$$

A képletben R az ellenállás, d a sűrűség, ρ a fajlagos ellenállás, A a vezeték keresztmetszete, m pedig a tömege. Látható, hogy azonos hosszúságú és ellenállású vezetők esetében az alumínium vezeték tömege közelítően fele a réz vezeték tömegének.

További elemzést érdemelnek a gazdaságossági szempontok. Közismert ugyanis, hogy a réz ára a világpiacon az utóbbi időben jelentősen emelkedett, amely indokolja az ár szerinti vizsgálatot is. Például egy D=1 mm átmérőjű 100 m hosszú réz vezeték árát összehasonlítva azonos ellenállású alumínium vezetékkel megállapítható, hogy az alumínium vezeték hatszor olcsóbb, mint a réz vezeték.

További globális összehasonlításra alkalmas az Ashby-féle minimális tömeg meghatározására kidolgozott modell (Ashby et al, 2004), melynek a vezetőképességre való adaptációját mutatja a következő gondolatmenet. Az elmélet alapján felírt összefüggés a minimális tömeg és a vezetőképesség között teremt kapcsolatot.

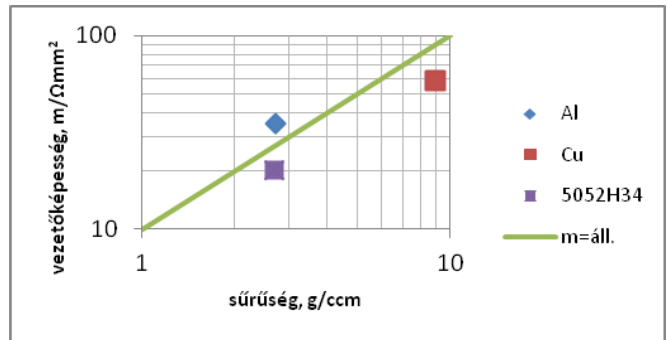
Az l hosszúságú A keresztmetszetű vezeték ellenállása az (1) képlet szerint, tömege a (2) összefüggés alapján írható fel azzal a különbséggel, hogy itt az R összefüggésében nem a ρ fajlagos ellenállás, hanem annak reciproka, a fajlagos vezetőképesség szerepel (ν). Ezzel az (1) egyenlet a következőképpen módosul (3):

$$R = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{l}{A} \quad (3)$$

Az egyenletből A-t kifejezve és a tömeg képletébe helyettesítve:

$$m_{min} = \frac{1}{R} \cdot l^2 \cdot \frac{d}{\nu} \quad (4)$$

A (4) egyenletből következik, hogy a minimális tömeg szempontjából egyenértékű anyagok olyan egyenes mentén helyezkednek el, melynek meredeksége a d- ν logaritmikus koordináta-rendszerben egységnyi, azaz 1 dekád vízszintes irányú elmozdulásra 1 dekádot emelkedik.



1. ábra. Réz és alumínium vezeték összehasonlítása minimális tömeg szempontjából

Az egyenes feletti anyagok jellemző pontja adja a kedvezőbb tömeget ahhoz képest, amely anyagok alatta helyezkednek el. Ezt szemlélteti az 1. ábra. Az ábrán a tiszta alumínium (Al) és réz (Cu) mellett egy AA5052_H34 jelű alumínium ötvözet pontja is fel van tüntetve, amelynek szilárdsága eléri a rézét ($R_m=260$ MPa). Látható, hogy ez hasonló pozícióban helyezkedik el, mint a réz, tehát a nagyobb szilárdsággal járó vezetőképesség csökkenés sem okoz rosszabb tömegarányt.

Az ismertetett összefüggések alapján a globális összehasonlításból az alábbi következtetések vonhatók le:

- Alumínium vezetékkel azonos ellenállás mellett kisebb tömegű tekercsek készíthetők
- Az alumínium vezeték tömege fele a rézvezetéknek, ára pedig hatoda
- Ezért ha a műszaki értékek megőrizhetők, akkor az alumínium vezeték alkalmazása tömegcsökkenést és árelőnyt jelent.

3. VEZETÉK ANYAGOK RANGSOROLÁSA TÖBBPARAMÉTERES OPTIMALIZÁLÁSSAL

A korábbi elemzésből egyértelműen következik, hogy a tekercs anyagok választásánál nem elég a globális elemzés, hanem többparaméteres optimalizálásra van szükség, mert ezzel biztosítható, hogy a megfelelő vezetőképesség és minimális tömeg együttes követelménye teljesüljön, ugyanakkor a működés közben fellépő áramlökések miatt a vezetékek hőtágulása, hősokk tűrése, a hőtágulás miatti mechanikai igénybevétel egyaránt figyelembe legyen véve.

Az optimalizálás első lépése azon paraméterek összegyűjtése, melyek a kívánt tulajdonság együttes meghatározásában szerepet játszanak. A rendelkezésre álló jellemzők széles köréből választjuk ki a legfontosabbakat a további elemzéshez. Fontos megjegyezni, hogy a kiválasztási stratégiák hatékonysága szempontjából a fizikai, mechanikai és hőtani jellemzőket olyan formára kell hozni, hogy a tulajdonság nagyobb értéke jelentse a pozitív, jobb tulajdonságot. Ezért például a fajlagos ellenállás helyett annak reciprokát, a vezetőképességet használjuk, mivel ennek magasabb értéke párosul a kisebb vezeték ellenállással. Hasonlóan a sűrűség helyett is annak reciprokát kell képezni, mert a nagyobb sűrűség nagyobb tömeget

eredményez, ezzel szemben a fajtérfogat (m^3/kg) nagyobb értéke könnyebb szerkezetet ad. Ezek figyelembevételével a fő jellemzők a következők:

- vezetőképesség
- szakitószilárdság
- fajtérfogat
- hőtágulási együttható
- hővezetési tényező
- fajhő

A lehetséges stratégiák áttekintését az irodalom tartalmazza (Ashby et al, 1997), ennek logikáját követve az alábbi lépések szerint lehet az optimális anyagválasztási eljárást kialakítani.

Adatbázis összeállítása

A számításba vehető anyagokra és tulajdonságokra egy olyan adatbázist kell összeállítani, amely hitelesen tartalmazza a tulajdonságokat. A kutatásokhoz erre a Matweb adatbázist használtuk.

Az adatok normálása

A könnyebb összehasonlíthatóság érdekében az adatokat úgy kell transzformálni, hogy minden paraméter legnagyobb értéke 1 legyen, ennek érdekében képezni kell a β_i hányadosokat minden tulajdonságra (5).

$$\beta_i = P_i / P_{\max} \quad (5)$$

Kumulált tulajdonság index képzése

Amennyiben több tulajdonság együttes összehasonlításával kapható meg az optimális anyag, akkor ennek egyszerű módja a normált paraméterek összegzése a

$$\gamma_i = \sum \beta_i \quad (6)$$

összefüggés szerint. Látható, hogy itt mindegyik tulajdonság azonos súllyal van figyelembe véve.

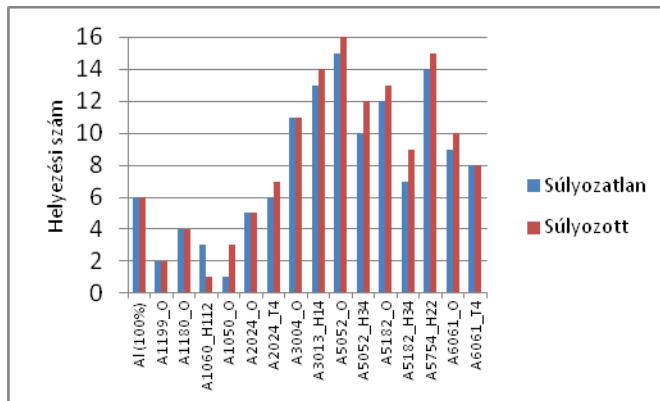
Súlyozott kumulált tulajdonság index

Ha a számításba vett tulajdonságok nem azonos fontosságúak, akkor ez egy w_i súlyzó faktorral fejezhető ki. Ilyenkor a módosított index:

$$\gamma'_i = \sum \beta_i w_i \quad (7)$$

A többparaméteres optimalizációnak a bemutatottakon kívül több változata is van, ugyanazon szerzőktől származó két publikáció érdemel külön említést (Seyed Hadi Mousavi-Nasab et al, 2017 és 2018)

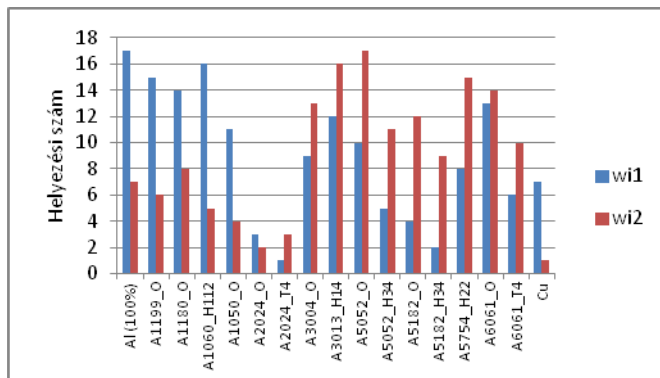
A bemutatott kiválasztási stratégia eredményeit a saját fejlesztésű alumínium vezeték adatbázisra alkalmazva a következőkben mutatjuk be. A súlyozatlan és súlyozott helyezési számok összehasonlítását a 2. ábra mutatja.



2. ábra. Helyezési számok összehasonlítása

Ebből megállapítható, hogy az első három helyezett A1050_O, A1199_O és az A1060_H112 sorrendje minimálisan tér el egymástól, és jellegre a többi anyag is hasonló indexeket kapott.

Az összehasonlítási stratégiát a három alapparaméter, a vezetőképesség, fajtérfogat és a szilárdság figyelembevételével lehet újraértékelni, és ebbe az összehasonlításba célszerű bevonni a rezet is, mint alapvető vezetékanyagot. A súlyozást két változatra végeztük el, első esetben mindhárom súly azonos, $w_{i1}=1/3$, míg a w_{i2} változat szerint a vezetőképesség súlya 0,45, a fajtérfogaté 0,35 és a szilárdságé 0,2. Az így nyert adatokat a 3. ábra mutatja.



3. ábra. Három paraméter szerinti összehasonlítás

Az ábrából látható, hogy azonos súlytényező esetében a nagyobb szilárdságú alumíniumötvözetek megelőzik a rezet, amely csak a 7. helyet foglalja el. Ha viszont az eltérő súlyozást választjuk, akkor a rezet lesz a legjobb vezetékanyag, és ezt a jó vezetőképességű, alacsony ötvöző tartalmú alumíniumötvözetek követik.

A két súlyozási modellt összehasonlítva a második változat tűnik műszakilag megalapozottabbnak, viszont ha a költségtényezőt is figyelembe vesszük, akkor ismét az alumínium tűnik a kedvezőbb megoldásnak, mivel annak költsége hatoda a rézhez viszonyítva.

4. A HŐTECHNIKAI TULAJDONSÁGOK SZERINTI ÖSSZEHASONLÍTÁS

A vezeték termomechanikai tulajdonságai alatt azokat a hőtechnikai és szilárdsági jellemzőket értjük, amelyek meghatározzák a tekercsben az elektromos munka hatására keletkező hő keletkezését, terjedését, valamint ezek hatására ébredő mechanikai feszültségeket és alakváltozásokat.

2. táblázat: Termomechanikai jellemzők

Megnevezés	Jelölés	Mértékegység
Hővezetési tényező	λ	W/(m*K°)
Fajhő	c	J/(kg*K°); J/(g*C°)
Felületi hőátadási tényező	h	W/(m²*K°)
Hőtágulási együttható	α	µm/m
Folyáshatár	R _{p0,2}	MPa
Rugalmassági modulus	E	MPa
Sűrűség	d	kg/m³, g/cm³

A legfontosabb jellemzőket, valamint azok jelölését és mértékegységét a 2. táblázat mutatja. A jellemzők értéke adatbázisokban található, az elemzésben szereplő adatok döntően a Matweb honlapról származnak.

Az egyes paraméterek értelmezését mutatjuk be a továbbiakban. A hővezetési tényező az egyik legfontosabb jellemzője a vezeték anyagnak, amely meghatározza, hogy az áramjárta vezetékben keletkező hő mennyi idő alatt távozik a gép többi részein keresztül a környezetbe. A tiszta alumínium hővezetőképessége 244 W/mK° a szobahőmérséklet környezetében. Ezzel szemben a réz jobb hővezető képességet mutat, értéke közelítően 430 W/mK°. Ezért a réz az áramlökések során keletkező hő elvezetésében első közelítésre jobbnak tűnik, mint az alumínium vezetéből készült tekercsek például motorokban vagy transzformátorokban. Ez a megállapítás csak abban az esetben igaz, ha geometriailag azonos tekercsekről van szó. Ez viszont nem lehetséges, mert az alumínium kisebb elektromos vezetőképessége miatt nagyobb átmérőjű huzalt kell alkalmazni, és így a két tekercs komplex tulajdonságai már hasonlóak lesznek. További fontos tényező ezeknél a hatásoknál a fajhő, amely viszont az alumínium esetében magasabb, mint a rézé.

Az alumínium hőtágulási együtthatója a 99,99 tisztaságú ötvözetnél $23,5 \cdot 10^{-6}$ 1/K°, amely a hőmérséklet és az ötvöző tartalom miatt viszonylag kevésbé változik. Ez nagyobb, mint a réz $16,6 \cdot 10^{-6}$ 1/K° értéke. Ezért a hőmérsékletváltozás miatt az alumínium-réz kötések lazulhatnak, vagy tekercsek, szabad vezeték esetében a méretváltozások nagyobbak lehetnek alumíniumnál. A két fém közötti kötések megbízhatóságát rugalmas előfeszítéssel lehet növelni.

Az alumínium fajhője több mint kétszerese a rézének, ezt a szakirodalom egyértelműen az alumínium pozitív tulajdonságának tekinti, mivel ez nagyobb hőelnyelő képességgel párosul. Ami azt jelenti, hogy azonos

hőmennyiség bevitele esetében az alumínium vezeték hőmérséklete kevésbé emelkedik, mint a rézé.

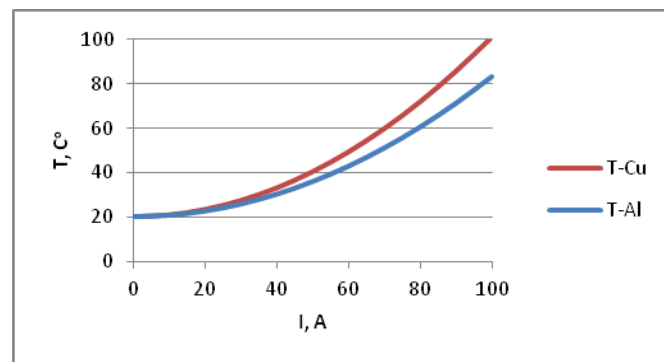
A bemutatott legfontosabb hőtechnikai jellemzők mellett a mechanikai paramétereknek is szerepe van a tekercsekben keletkező hőfeszültségek elviselésében. Ebben elsődleges szerepe van a rugalmassági modulusnak és az egyezményes folyáshatárnak. Kerek értékeket véve az alumínium rugalmassági modulusa 70 GPa, a rézé pedig 120 GPa, tehát lényegesen magasabb. Közelítően négyszeres arány vonatkozik a folyáshatárra, ez a paraméter a rézre 120 MPa, alumíniumra 30 MPa.

A röviden vázolt hatásokat modell számításokkal pontosítjuk olyan alumínium és réz vezeték felhasználásával, ahol az alumínium vezeték keresztmetszete 25 mm², tehát sugara 2,82 mm. Az ezzel egyenértékű réz vezeték keresztmetszete 16 mm², sugara pedig 2,2 mm. Ezzel az egyenértékűséggel biztosítható, hogy a villamos ellenállás szerint közel egyenértékű vezetőket hasonlítsunk össze. A vizsgálatokban a következő tényezőket elemezzük:

- I áramerősséggel terhelt vezeték állandósult hőmérséklet növekedése
- Hőmérséklet változás ΔI áram növekedés hatására
- Hőmérséklet eloszlás a vezetékben
- A hűlés folyamatának jellemzése
- A hőtágulás jellemzése

Eredmények:

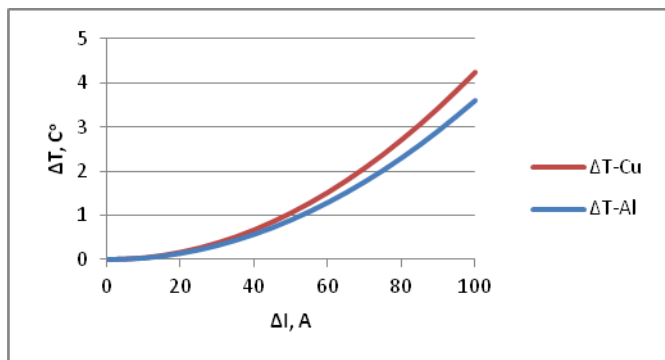
A 20 C° környezeti hőmérséklethez képesti T hőmérséklet $h=10$ [W/m²C°] felületi hőátadási tényező esetében a $T=I^2 \cdot \rho / 2\pi h^3 \pi^2$ képlettel számítható.



3. ábra. Áramjárta vezető hőmérséklete állandósult állapotban

A 3. ábrából látható, hogy a réz vezetékben magasabb hőmérséklet alakul ki azonos áramerősség esetében, mert a kedvezőbb vezetőképesség miatt a hőátadási felület csökken, és ezen kevesebb hő tud átáramolni, mint az alumínium vezeték esetében.

A hőmérséklet változás 20 s-ig tartó ΔI áram növekedés hatására $\Delta T = I^2 \cdot \rho \cdot \Delta t / (c \cdot (r^2 \cdot \pi)^2 \cdot d)$, ez a 4. ábrán látható.

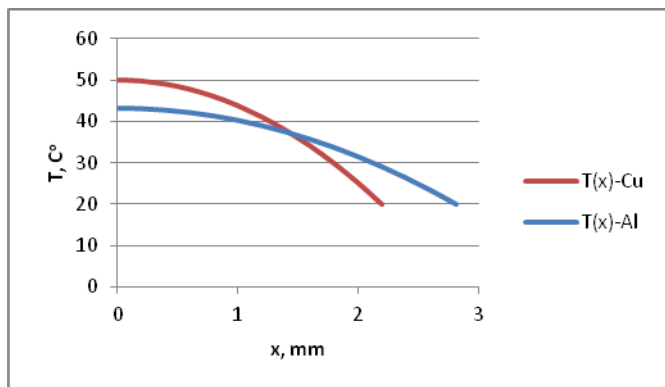


4. ábra. Áramlökés hatására kialakuló hőmérséklet növekedés

Mivel az alumínium fajhője 2,35-szöröse a rézének, emiatt itt keletkezik alacsonyabb hőmérsékletváltozás. A különbség azért nem nagyobb a két fém között, mert ugyanakkor viszont a réz sűrűsége 3,3-szor nagyobb az alumíniumnál, ami a tömegben okoz előnyt a réz javára még akkor is, ha a rézvezeték átmérője kisebb az alumíniuménál. Így a három szempont pozitív és negatív hatásai kiegyenlítik egymást, ezért nem lehet egy tulajdonság alapján ítéletet mondani a két vezeték anyag összehasonlítása során.

A vezetékben kialakuló hőmérséklet eloszlást az 5. ábra mutatja. Itt az alumínium vezeték egyenértékű sugara 2,82 mm, míg a rézé 2,2 mm. A kiinduló hőmérsékletet az állandósult állapotban 60 A áramerősség hatására kialakult vezeték hőmérséklettel azonosítjuk, amely a korábbiak szerint a réznél magasabb. Mindkét vezetékben parabolikus a hőmérséklet eloszlás, természetesen a réz esetében a hőmérséklet gradiens erőteljesebb csökkenést mutat. Összefüggés:

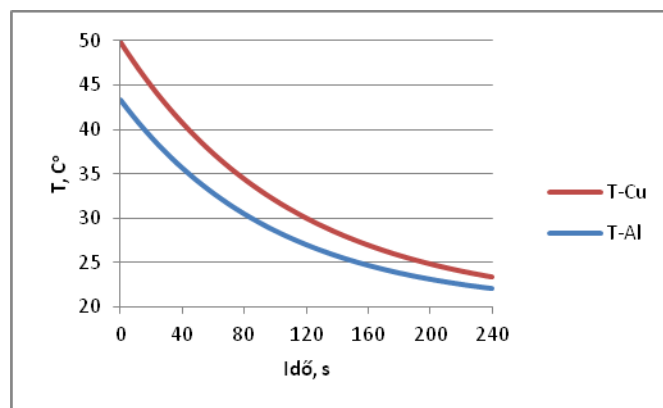
$$T(x) = \frac{q_v \cdot R^2}{4 \cdot \lambda} \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right] + T_k$$



5. ábra. Hőmérséklet eloszlás a kétféle vezetékben

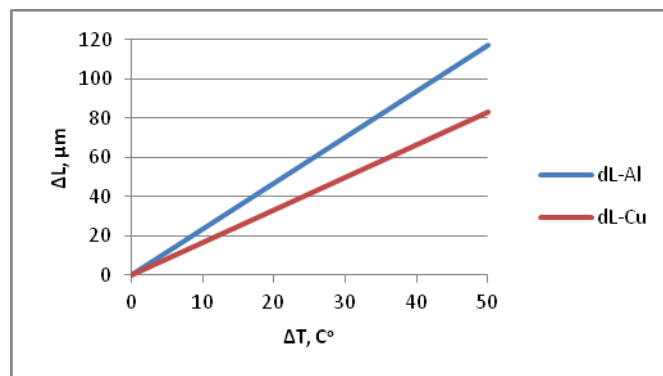
A hűlési folyamatot elemezve megállapítható, hogy az áramterhelés megszűnése után állandó hőmérsékletről indítva a hűlési folyamatot a két vezeték gyakorlatilag azonos idő alatt hűl le. Ha az állandósult állapotban kialakult hőmérsékletről indítjuk a számítást a $T = (T_{max} - T_k) \cdot e^{-m \cdot t} + T_k$ képlettel, akkor az

alumínium hűlési görbéje végig a rézé alatt halad, ahogy a 6. ábrán látható.



6. ábra. Réz és alumínium vezeték hűlése

A $\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$ [μm] összefüggés alapján számolt hőtágulási mértéket a 7. ábra mutatja 100 mm hosszú vezeték szakaszra. Látható, hogy például 50 °C hőmérséklet növekedés hatására az alumínium vezeték közel 120 μm-t nyúlik, amely a tekercsben lazulást okozhat. Ennél kisebb mértékű a réz 80 mm körüli méretnövekedése.



7. ábra. A hőtágulás mértékének összehasonlítása

A bemutatott hőtechnikai elemzésből az alábbi következtetések vonhatók le:

- A szakirodalomban leggyakrabban a réz és alumínium vezeték egy-egy tulajdonságát, ritkábban néhány komplex mutatót hasonlítanak össze, amelyek nem jellemzik kielégítően a két vezetékanyag eltérő viselkedését.
- A kidolgozott diagramok a két vezeték sokoldalú elemzésére nyújtanak lehetőséget, és a sokszor egymással ellentétesen változó paraméterek esetében is kellő eligazítást nyújtanak az összehasonlításra.
- A réz vezetékben magasabb hőmérséklet alakul ki azonos áramerősség esetében, mert a kedvezőbb vezetőképesség miatt a réz vezeték keresztmetszete kisebb, ezáltal a hőátadási felület csökken és ezen kevesebb hő tud átáramolni, mint az alumínium vezeték esetében.

- A Δt ideig ható ΔI áram növekedés a vezeték hőmérséklet növekedését eredményezi, ennek mértéke a fajlagos ellenállástól, fajhőtől és a sűrűségtől függ. Mivel ezek a tulajdonságok a két vezeték anyagnál ellentétesen változnak, a paraméterekben mutatkozó különbségek kiegyenlítődnek, ezért a hőmérséklet változás közel azonos lesz.
- A sugár függvényében számított hőmérséklet eloszlás mindkét vezetőben parabolikus jellegű, természetesen a réz esetében a hőmérséklet gradiens erőteljesebb csökkenést mutat.
- Állandó hőmérsékletről indítva a hűlési folyamatot a két vezeték gyakorlatilag azonos idő alatt hűl le, lényeges különbség nem mutatkozik közöttük.
- Az alumínium nagyobb hőtágulási együtthatója miatt a vezeték jobban nyúlik a hőmérséklet változás hatására, a réz nyúlása közelítően 2/3 része az alumíniumnak.
-

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A bemutatott sokoldalú elemzés alapján megállapítható, hogy az alumínium és réz vezeték alkalmazhatóságáról egy-egy kiragadott mutató alapján nem lehet reális képet adni, erre több szempont szerinti mérlegelés lehet alkalmas. A cikkben a globális mutatók mellett bemutattunk egy lehetséges módszert a több paraméteres tulajdonság összehasonlításra, melynek során súlyozatlan és súlyozott faktorok alapján értékeltük a különféle vezeték anyagokat. ezt követően részletes hőtechnikai elemzést végeztünk a vezeték üzem közbeni viselkedésének jellemzésére.

IRODALOMJEGYZÉK

- Ashby, M.F. Bréchet, Y.J.M. Cebon, D. Salvo, L. (2004). Selection strategies for materials and processes, *Materials and Design* **25** (2004) 51–67
- Ashby, M.F. et al. (1997). Materials Selection and Design. *ASM Handbook* Volume **20**, ASM International Handbook Committee.
- Dong Angelia (2015). Performance Comparison between Enameled Aluminum Wire and Enameled Copper Wire. *Technologia*, 2015. <https://www.slideshare.net/DongAngelia/performance-comparison-between-enameled-aluminum-wire-and-enameled>
- Jablonsky, M., Knych, T., Smyrak, B. (2009). New aluminium alloys for electrical wires of fine diameter for automotive industry. *Archives of metallurgy and materials*, Volume **54** Issue 3.
- Seyed Hadi Mousavi-Nasab, Alireza Sotoudeh-Anvari (2017). A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems. *Materials and Design* 121 (2017) 237–253
- Seyed Hadi Mousavi-Nasab, Alireza Sotoudeh-Anvari (2018). A new multi-criteria decision making approach for sustainable material selection problem: A critical study on rank reversal problem. *Journal of Cleaner Production* 182 (2018) 466–484
- Yanniello, B. (2006). Aluminum — The Other Conductor. Eaton Corporation, *Publication No. IA08703001E / Z4488*

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást az EFOP-3.6.2-16-2017-00002 számú projekt támogatta. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg



CAETS

„XIII. IFKK 2019” Budapest
Online: ISBN 978-963-88875-4-2

Paper 32
Copyright 2019 Budapest, MMA.
Editor: Dr. Péter Tamás