



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

Gyergyádesz László

**NAGYFESZÜLTSGŰ SZABADVEZETÉKI
SZERELVÉNYEK ÁLLAPOTÉRTÉKELÉSÉNEK
TOVÁBBFEJLESZTÉSE**

TDK dolgozat

KONZULENS

Dr. Cselkó Richárd

BUDAPEST, 2021

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
Abstract.....	5
1 Bevezetés	6
2 Elméleti áttekintés.....	7
2.1 Több elemi szálból álló sodronyok markolóprései	7
2.1.1 A kötések ellenállásmérésének pontossági kérdései.....	7
2.1.2 Hibás kötések cseréje nélküli megoldások	8
2.2 Megoldások különböző típusú kötések esetén	9
2.3 Drónok alkalmazása a szabadvezeteki diagnosztikában.....	10
2.3.1 Átmeneti ellenállás mérése	11
2.3.2 Egyéb szabadvezetékhez kapcsolódó alkalmazások.....	12
2.3.3 Összehasonlítás robottechnológiákkal.....	14
3 Vizsgálatok	17
3.1 Minták adatai	17
3.2 A mérésekhez használt eszközök.....	19
3.3 Szennyeződés hatása	20
3.4 Nem megfelelő előkészítés hatása	21
3.4.1 Paszta hiánya.....	21
3.4.2 Félig inzertált sodrony	21
3.5 Különböző meghúzási módok hatása.....	22
3.5.1 Meghúzás réz összefogó rézbetéttel	22
3.5.2 Befejezetlen meghúzás	23
3.6 Hiányzó vagy sérült sodronyszálak hatása	23
3.7 Húzóerő megváltozásának hatása	24
4 Következtetések.....	26
5 Összegzés.....	28
Köszönetnyilvánítás	29
Ábrajegyzék.....	30
Irodalomjegyzék.....	31

Összefoglaló

A big data és smart grid korában a villamosenergiarendszer-irányítók érdeke, hogy az adódó technológiai lehetőségekkel élve minél hatékonyabban jussanak információhoz szabadvezetési vonalaik állapotáról. Azonban e folyamatok intenzitása rendkívül eltérő különböző országokban, hiszen egy viszonylag szűk piaci választék, nem szabványosított követelmények, változatos körülmények és előrehaladottság jellemzik a szabadvezetési diagnosztika kérdéskörét.

A nagyfeszültségű szabadvezetési hálózatok monitorozásának egyik kiemelt kérdése a sodronyok kötéseinek vizsgálata. Az elsődlegesen használt paraméter egyértelműen az átmeneti ellenállás, azonban a mérések kivitelezése és az eredmények kiértékelése már kevésbé magától értetődő. A nem megfelelő pozícióban végzett mérés vagy a befolyásoló körülmények figyelmen kívül hagyása hamis mérési eredményt okozhat.

Specifikus probléma a préselt típusú és húzószilárd nagyfeszültségű kötések diagnosztikája, hiszen cseréjük feszültség alatti munkavégzéssel jelenlegi technológiákkal nem megoldható. Jelen dolgozat keretében számos mérést végzünk ilyen típusú kötésekkel, különböző típusú hibaforrással rendelkező mintadarabokkal dolgozva.

Abstract

In the age of big data and smart grids, it is the interest of transmission system operators to make use of the available technologies to increase the efficiency of gathering information on the condition of their high voltage overhead transmission lines. The intensity of such procedures may highly differ in distinct countries; a relatively small market size, unstandardised requirements, different circumstances and development stage are the main components overhead-line diagnostics.

One of the main problems arising during the monitoring of the overhead-lines is the inspection of conductor joints. The contact resistance is the primarily used parameter, although the implementation of the desired measurements and the evaluation of the tests are not completely evident. Measurements taken with incorrectly placed electrodes or ignoring certain circumstances may corrupt the results.

Diagnostic inspection of high voltage full tension and compression type joints is even more specific, as it is currently not possible to replace them with live-line working methods. In this paper I present the results of an extensive measurement series, that includes numerous samples of the aforementioned joints with different conditions.

1 Bevezetés

Az Európai Unió állásfoglalása [1] az energiaellátás és a klímaváltozás tekintetében egyértelmű: a fenntarthatóság és a költséghatékonyság jegyében kiemelt fontos a hálózatok monitorozása és az eszközgazdálkodás (asset management). A vonatkozó ISO szabvány [2] 2014-ben került frissítésre, így az eszközgazdálkodási rendszerek szabványnak való megfelelése is időszerű. Ennek érdekében a karbantartási munkálatok számát növelni kell, valamint drónok és robottechnológiák segítségével diagnosztikai vizsgálatokat kell végrehajtani, továbbá nagymértékű digitalizáció a cél.

Lényegesen kevesebbszer szükséges szabadvezetéki kötések cserélni az átviteli hálózaton, mint az elosztóhálózaton: a nagyfeszültségű szabadvezetéki vonalak sokkal masszívabb sodronyokkal és kötőszerelvényekkel rendelkeznek, az elemi veszélyforrásokkal és a degradációs mechanizmusokkal szembeni ellenállóságra tervezve. Valamint ezek a vonalak magasabb oszlopok mentén helyezkednek el és más típusú környezettel rendelkeznek (magas százalékban a lakott területeken kívül), így kevesebbszer történik velük végzetes vagy komoly károsodást előidéző esemény.

Amennyiben egy kötésről kiderül, hogy nem képes kielégítően ellátni villamos vagy mechanikai feladatát, akkor a legkézenfekvőbb megoldásnak a csere tűnik a következő karbantartási időszakban, lehetőség szerint feszültség alatti munkavégzéssel. Azonban a nagyfeszültségen alkalmazott kötések egy részénél nem oldható meg FAM módszerrel a csere, a felhasználási helytől és céltől, valamint a kötés felszerelési módjától függően. A téma szabványosítása csak a tesztelési módokra, vizsgálati előírásokra, az alkalmazható kötéstípusokra és az installáció körülményeire adott, így az az állapotértékelés további kérdéseinek kutatása ebből a szempontból is indokolt.

2 Elméleti áttekintés

Dolgozatom bár nem közvetlen, de szoros folytatása a 2020-as évben a VIK Energetikai szekciójában leadott dolgozatomnak [3][1], melyben részletes összefoglaló olvasható az átmeneti ellenállás fizikájáról. Ebben áttekintettem az okokat, a befolyásoló tényezőket, a lehetséges matematikai modelleket, valamint a szabadvezetéki kötések esetét is tárgyaltam. A dolgozatban összegyűjtöttem számos online mérési megoldást, melyek közül kiemelten foglalkoztam a sodrony mentén haladó diagnosztikai robotokkal (overhead-line crawling robot, inspection robot). Ezt a sort folytatandó és a méréseket előkészítendő, ebben a fejezetben kifejték néhány további, a szabadvezetéki diagnosztika és állapotértékelés szempontjából releváns témát.

2.1 Több elemi szálból álló sodronyok markolópréses kötése

A dolgozatomban megtalálható mérések mindegyike nagyfeszültségen alkalmazott, markolópréses technikájú kötéshez kapcsolódik. Ezen kötések az installációt követően egy tömböt alkotnak a sodronnyal, hiszen a markolópréssel való meghúzás megfolytatja az alumíniumot. Ebből adódóan az ilyen típusú, különösképpen a tartópontokon alkalmazott kötések meghibásodása nem javítható egy eszközcsere megvalósító FAM procedúrával, így az állapotértékelésük kiemelt jelentőséggel bír.

2.1.1 A kötések ellenállásmérésének pontossági kérdései

A több elemi szálból álló sodronyra rögzített, markolópréses kötések ellenállásmérésénél a következő aspektusokat mindenképpen figyelembe kell venni.

2.1.1.1 Árambetáplálás

Az ellenállásmérés egyik kritikus megoldandó problémája az egyenletes árambetáplálás. Ez azért nem magától értetődő, mert a nagyfeszültségű sodronyok számos elemi szála nem tekinthető elhanyagolható vastagságú vezetőknek, valamint a belső vezető elemi szálakban sem egyenlő az áramsűrűség a betáplálási pont keresztmetszeti síkjában. Amennyiben a homogén áraminjektálást nem lehet biztosítani, úgy a mérési pontot a kötéstől távolabb kell megválasztani. Az ilyen inhomogén táplálás esetén exponenciális jelleggel egyenlítődik ki a teljes sodronyon belül a betáplálási ponttól mért hossz függvényében. [5]

2.1.1.2 Feszültségmérés

Inhomogén betáplálás esetén a potenciál nem lesz egyenlő az elemi szálak érintési felületén a betáplálás keresztmetszeti síkjában, így a megfelelő mérési pont a kötéshez egy közelebb eső, már kiegyenlített potenciálú pont lehet. Ideális esetben egy ilyen pontban tetszőleges sodronyszál érintésével végezhető a feszültség mérése, de nem ideálisan kiválasztott távolságok esetén is kisebb mérési hibát jelent ez a módszer, mint a betáplálási ponton való mérés. További lehetőség még a feszültségkiegyenlítők használata, melyet az IEC szabadvezeteki vizsgálatokra vonatkozó szabványában is közöl. [5][6]

2.1.1.3 Egyenetlen degradáció

Nehezítő körülmény, ha egy sodrony felületén valamely degradáció vagy sérülés egyenetlen mértékben van jelen: ez nemcsak mérési hibát visz az eredménybe, de teljesen meg is hamisíthatja azt. Ezt a 2020-as dolgozatomban méréssel is prezentáltam. [3] Amennyiben ez a degradáció látható nyomokkal jár együtt, úgy egy élőképet közvetítő diagnosztikai robottal végzett ellenállásmérés esetén módosítható a mérési elrendezés. Adott esetben vizuálisan nem észlelhető az egyenetlen degradáció, ekkor az alkalmazott elektródnak kell arra alkalmasnak lennie, hogy a sodronyon a feszültségmérést több pozícióban, preferáltan elemi szálanként lehessen vele mérni.

2.1.2 Hibás kötések cseréje nélküli megoldások

Sok esetben nem szükséges az adott kötőelemet kicserélni, ha annak az átmeneti ellenállása megnövekedett a kritériumokat meghaladó mértékben megnövekedett: az alkalmazás helyétől függően elhelyezhetőek javító kötések (pl.: terelő összekötő, páncél összekötő) a sodronyon.

Tipikus példa erre a helyzetre, mikor valamely káresemény miatt elszakadt sodronyt egy húzószilárd, markolóprésses toldókötéssel állítottak helyre; majd egy későbbi karbantartási hullámban nem megfelelő ellenállásértéket mértek a vizsgálatot végzők. Ekkor hot stick FAM módszerrel, a kötést helikopterrel megközelítve el lehet elhelyezni egy terelő összekötőt a jelenlegi kötés fölé, mely átveszi a villamos feladatot (ezzel megoldva az átmeneti ellenállás problémáját), azonban a mechanikai feladatot nem. Az ilyen jellegű megoldások gazdaságosak, hiszen nincs szükség távvezetékszakasz feszültségmentesítésére, nem növekszik sem a SAIFI, sem a SAIDI

mutató. Továbbá nem szükséges sodronycsere vagy újabb komolyabb apparátust igénylő beavatkozás sem, mint amilyen a markolópréses kötés cseréje.

2.2 Megoldások különböző típusú kötések esetén

Az alábbi táblázatban összefoglalom a nagyfeszültségű szabadvezetéseken alkalmazott kötésfajtákra vonatkozó megoldásokat nem kielégítő kondíció esetén. Az egyértelműség céljából zárójelben szerepel a kötés angol megnevezése is. A témával foglalkozó kutatásokban gyakran olvasható az kissé hanyag megközelítés, hogy a szabadvezetési kötések mindössze két lehetséges célt valósítanak meg, azonban ennek cáfolata könnyen igazolható gyártók katalógusainak tanulmányozásával vagy a témában illetékes szakemberek megkérdezésével.

A sodronyok javításánál szereplő rövidítések feloldása:

- v.: villamos vezetőképesség visszaállítása
- e.: mechanikai javítás, az alumínium elemi szálak 100%-os sérülése esetén
- m.: teljes mechanikai javítás, az acélmag szakadása esetén
- f.: felületi javítás, a külső alumínium réteg bizonyos fokú sérülése esetén

A FAM módszerrel értendő cserélhetőségre adott nemleges válasznak több oka is lehet. Szakadt sodrony esetén a távvezeték zárlati állapotát meg kell szüntetni, illetve a két sodronyfelet a megfelelő magasságba fel kell húzni, míg húzószilárd (full tension) kötések esetében nemcsak a sodronyok önsúlyának megtartása, hanem az eredeti elem sodronyról való eltávolítása is problémát jelent.



1. ábra Nagyfeszültségű sodronyon használt markolópréses feszítő

NaF kötés megnevezése (angol megnevezés)	NaF kötés célja, alkalmazása	NaF kötés hibája esetén megoldás	megoldás FAM módszerrel
áramkötés (jumper)	oszlopközi sodronyok összekötő sodronya oszlopkónál	csere, markolóprézés feszítő áramkötésre rögzített felével	igen
burkolópálca (armor rod)	sodrony javítása (v., f.) védelem kopás, hajlás ellen	csere	igen
markolóprézés összekötő ¹ (full tension splice/mid-span joint)	sodrony javítása (v., e., m., f.)	terelő összekötő, páncél összekötő felhelyezése	nem
javitóhüvely (repair sleeve)	sodrony javítása (v. és f.)	csere	igen
lengőtartó (suspension clamp)	sodrony felfüggesztése tartóoszlopkónál	csere	igen
markolóprézés feszítő (dead-end & jumper terminal)	oszlopköz sodronyait és áramkötést összekötő, csavarozott kétrészes kötés	csere	nem
páncél összekötő (armor splice)	sodrony javítása (v., e., f.)	csere	igen
terelő összekötő (splice shunt)	kötés javítása (v.)	csere	igen
toldókötés (line splice)	sodrony javítása (v., e., f.) homogén vezetők toldása	csere	igen

2.3 Drónok alkalmazása a szabadvezetési diagnosztikában

A 2000-es évek eleje óta megnövekedett a drónok, más néven pilóta nélküli repülőgépek alkalmazási területe: az addig szinte csak katonai célokra fejlesztett darabok mellett megjelentek más iparágakban is ezek az eszközök. A kommersziális célokra használt és a köznapi, egyszerű drónok mellett azonban megjelentek az speciális problémákhoz fejlesztett projektek is, melyre nagy iparágak, köztük a villamosenergia-szektor is igényt tart. Ez az igény pedig minden valószínűség szerint jogos, hiszen az elmúlt 10 évben számos tanulmány keletkezett szabadvezetési vonalak drónnal való ellenőrzéséről. [4]

¹ gyakran húzószilárd toldókötés néven

Az elkövetkező években a villamos ipari és különösen a szabadvezetéki diagnosztika legalkalmasabb eszköze a pilóta nélküli repülőgépek lehetnek a diagnosztikai robottechnológiák mellett: a két legfontosabb szempont a vizsgálatok sebessége és a különböző érzékelő- és adatrögzítő-rendszerek szimultán elhelyezhetősége. Ezt már számos rendszerirányító felismerte, és nagyfeszültségű szabadvezetéki vonalain már alkalmazza is a drónokat, továbbá egyéb rendszerirányítók már középvezettségű hálózatokon való bevetést is terveznek, bár módosított feladatkörrel.



2. ábra 400 kV-os szabadvezeték egy drónnal készített légifelvételen

2.3.1 Átmeneti ellenállás mérése

Jelenleg nem érhető el olyan dróntechnológia, melynek segítségével közvetlen módon lenne mérhető ellenállás. Egyrészt az elektromágneses kompatibilitási követelményeik miatt csak egy adott távolságig közelíthetik meg a szabadvezetéseket, másrészt a szabadvezetékkel ütközve a jelenlegi típusú drónok szinte biztosan irányíthatatlanná válnak.

Ugyanakkor a dróntechnológia kiválóan alkalmas termovíziós eszközök kezelésére, mellyel észlelhető az átmeneti ellenállás következményeképp jelentkező melegedés. Ez a módszer azonban csak a meghibásodások előrehaladott állapotában képes pontos diagnózist nyújtani, eredménye nem 100%-os, és használatát számos tényező korlátozza, úgy, mint a terhelő áram, a visszaverődés, a napsugárzás, a szél, a sodronytól való távolság vagy az anyagjellemzők. A minőségi tényező² 3-nál nagyobb

² minőségi tényező vagy k-érték = $R_{kötés}/R_{sodrony}$

értéke esetén a kötés veszélyes állapotban van, azonban már normális mértékű áramterhelés esetén is komoly hiba következhet be. Ennek ellenére a thermovíziós módszerű detektálás nem garantált, mert a korábban említett tényezők elrejthetik, maszkolhatják a túlmelegedést a hőkamerák előtt, [9][10] így teljes mértékben nem hagyatkozhatunk a vizuális és thermovíziós eszközökre, indokolt az analóg, közvetlen megközelítés is. A markolóprések, húzószilárd kötések cseréjéhez támasztott kondíció (villamos vagy hőmérsékleti) rendkívül változatos eltérő földrajzi területeken: míg például Olaszországban $k = 2-3$ esetén már a kötés cseréjét írják elő, addig ezt a kanadai Hydro Québec csak $k > 1,5$ esetén teszi [11].

A jövőben azonban nem elképzelhetetlen a jelenlegi helyzet megváltozása, ugyanis a Hydro Québec már 2016 óta dolgozik egy olyan drónon [11], mely képes a feszültség alatti sodronyon landolni, egyesítve a diagnosztikai robotok és drónok előnyeit. A LineDrone nevű modell még fejlesztési fázisban van, de 2020-ban megszületett egy szerződés a Drone Volt-tal, melynek keretében piacra kerülhet. Jelenleg korróziódetekciós szenzorával a sodrony élettartamára végez becslést az eszköz, azonban online ellenállásmérők felszerelése is elképzelhető, hiszen a cég diagnosztikai robotjai rendelkeznek e funkcióval.

2.3.2 Egyéb szabadvezetékhez kapcsolódó alkalmazások

Az eszközgazdálkodás új gyakorlatai jelennek meg villamosenergia-átvitel terén is, hiszen a drónok és robotok segítségével értékelhető mennyiségű adat áll a rendszerirányítók rendelkezésére. Várhatóan a közeljövőben eldőlni fog, hogy valóban megtérülő-e a közvetlen ellenállásmérés segítségével vizsgálni a nagyfeszültségű szabadvezeteki vonalak kötéseit, azonban egyéb módszereket már jelenleg is bevetnek a diagnosztikai, hibamegelőzési és hibajavítási munkálatok során.

2.3.2.1 UV-kamerás vizsgálat (drón, robot)

Az UV-fénytartományra érzékeny kamerák kiválóan alkalmasak a koronakisülések észlelésére, melyek destruktív hatását kívánatos minél hamarabb észlelni, a szigetelők átütését elkerülendő. [16]

2.3.2.2 Sodronyhúzás (drón)

Újonnan épülő távvezetékek esetében, továbbá sodronycserénél drón segítségével is lehetséges a sodronyt az oszlopig felemelni, illetve egy oszlopköz

távolságban azt áthúzni. Ez a megoldás indokolt lehet a helyszín rossz megközelíthetősége esetén (folyó, autópálya, vasútvonal). [17]

2.3.2.3 Időjárási események utáni ellenőrzés (drón)

Különösen középvezettségű vonalak esetén lehet szükség a szabadvezetékek növényzet szempontjából kritikus szakaszainak bejárására a kiemelkedő erejű viharok után. A környező fákról leszakadó vagy a szél által felkapott ágak miatt elszakadhatnak a sodronyok és ezzel párhuzamosan a szabadvezeték szerelvényei is megsérülhetnek.

2.3.2.4 Hibahelyek felderítése (drón)

A kis- és középvezettségű hálózatok egyik kiemelt problémája, hogy kiesések esetén sokkal nehezebb behatárolni a hiba helyét, egyrészt a távolsági védelmek hiánya, másrészt a gyakori domborzati és növényzeti akadályok miatt. Így az átviteli hálózattal szemben indokolt lehet a drónok bevetése, hiszen egy nehezen járható, 5-10 km hosszúságú szakaszon egy drónkezelő az élőkép segítségével gyorsan megtalálhatja a pontos koordinátákat.

2.3.2.5 Lézerszkennelés (drón, robot)

A LiDAR egy aktív távérzékelési technológia, amelynek előnye, hogy nagy területről gyorsan, nagy pontosságú adatgyűjtésre képes a föld felszínéről, és képes olyan területeken is mérni, ahol a földi geodéziai méréseket csak nagy erőforrásigénnyel lehetne megvalósítani. A technológia sajátosságaiból adódóan az időjárási körülmények kevésbé befolyásolják. Különösen alkalmas a felszínborítás modellezésére, valamint segíthet a hibahelyek későbbi pontos behatárolásában és a növényzet esetleges behatolásának feltérképezésében.



3. ábra AIR6 Systems Wiris 8

2.3.3 Összehasonlítás robottechnológiákkal

2.3.3.1 Hatótávolság

Drónok esetében a repülési üzemidőt szokás megadni, hiszen feladattól függően más-más sebességet választ meg a drónkezelő és a drón fogyasztási profilja is eltérő. Azonban a drónok kommunikációs hatótávolságát (jellemzően 3-5 km) és végsebességüket figyelembe véve látható, hogy egy akkumulátornyi töltéssel és a drón felszíni követésével a kommunikációs hatótáv többszörösére is el lehet röptetni. Diagnosztikai robotok esetében igen változatos távokkal rendelkeznek ez egyes modellek, de általánosságban elmondható, hogy kisebb hatótávval (Kinectrics LineVue: 4 km [18], Expliner: 200 m [19], LineScout: 4,8 km [20]) és kisebb kommunikációs hatótávval rendelkeznek.

2.3.3.2 Sebesség

Három különböző részfeladat sebességét érdemes összehasonlítani: a sodronymenti haladást, a szabadvezetéki bevetéshez való előkészítést és feljuttatást és a kiértékelési-továbbítási fázist. Természetesen az első szempont modellfüggő, de így is egyértelműen látszik, hogy egy drónnal 25-30 km/h-val gyorsabban lehet közlekedni, de még sokkal magasabb (~70 km/h) végsebességekkel rendelkeznek bizonyos termékek [13].

A következő fázisban szintén gyorsabbak a drónok, hiszen a robotok sodronyra emelése FAM szakszemélyzet segítségével lényegesen több időt vesz igénybe, mint a drón megfelelő repülési magasságba irányítása. A jelenlegi legkritikusabb pont azonban a robotoknál a különböző akadályok leküzdése: a legtöbb modell még erre egyáltalán nem képes, vagy csak nagyon specifikus, oszlopközben elhelyezett tárgyakat (légiakadály-jelző, távtartó), vagy pedig adott méretű és típusú felfüggesztési pontot képes megkerülni. Az áramkötéseken való oszlopmegkerülés pedig egyáltalán nem megoldott.

Végül az adatok továbbítását vizsgálva nincs jelentős különbség, hiszen mindkét platformon beépített számítógép rögzíti a méréseket, és a földi egység számára tetszőleges kommunikációs összeköttetést lehet biztosítani. Azonban közvetlen ellenállásértéket a diagnosztikai robotok képesek biztosítani, drónok felvételeiből a

visszaszámolt, egyéb mért jellemzőkkel kompenzált érték utólag, vagy késleltetéssel nyerhető ki a képanyagból.

2.3.3.3 Univerzális felhasználhatóság

Egy jelentős különbség a két technológia között az eszközök tömege: míg a drónoknál csak magát az eszközt kell figyelembe venni a felszerelt eszközök összömege miatt, addig a robotoknál figyelembe kell venni a sodrony mechanikai terhelhetőségét. Bár számos robot tömege a 20-30 kg-os sávban van, így elméletileg közép feszültségen is bevethetőek, az igazán effektív, akadályleküzdésre képes eszközök ennél nehezebbek, így csak nagyfeszültségű sodronyokon való haladás jöhet szóba.

Bár mind a kettő eszköztípus több funkciót képes akár egyszerre is ellátni, drónokkal lényegesen sokrétűbben lehet dolgozni, mozgásterükből fakadó előnyük miatt (szabadvezetési szakasz monitorozása, lézerszkennelés). Továbbá egyéb feladatok végrehajtására is képesek, melyet a 2.3.2 alfejezetben részletezek.

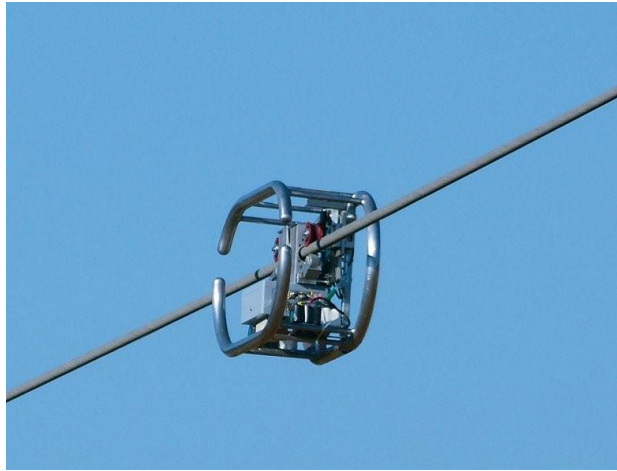
2.3.3.4 Költségek

Sajnos költségek szempontjából nehéz összehasonlítani a két kategóriát, ugyanis rendkívül eltérő a piaci elérhetőségük. Több cég számos drónmodelljének nyilvános adatként elérhető az ára, míg a robotoknál ez az információ nem felelhető, igaz, nem is jelennek meg viszonteladók webáruházaiban. A drónok és robotok költségeinek legfőbb összetevői: beszerzés, képanyag és egyéb szenzorok által rögzített adatok kiértékelésére alkalmas szoftver, képezett pilóta, illetve FAM szakszemélyzet. Ezek közül a beszerzési ár jelentheti a legnagyobb különbséget, feltehetően a drónok előnyére, hiszen a piaci elérhetőség és a fejlesztési fázisból való kilépés is alacsonyabb ár irányába mutat.

2.3.3.5 Összegzés

Az összegyűjtött ismeretek alapján nem jelenthető ki, hogy bármelyik technológia helyettesíthetné a másikat, ha a nagyfeszültségű szabadvezetési szerelvények állapotértékelése a cél. Míg a drónok segítségével könnyebb nagy mennyiségben adatot gyűjteni, és ezáltal komplex eszközgazdálkodást megvalósítani, addig a szabadvezetéken közlekedő robotok a közvetlen ellenállásméréssel, korróziódetekciós szenzorokkal és esetleges jövőbeli funkcióikkal a szerelvények

lehető legpontosabb analízisét lesznek képesek nyújtani a rendszerirányítók számára, betekintést nyújtva a kötések élettartama alatti állapotváltozásokba.



4. ábra Kinectrics LineVue

3 Vizsgálatok

A szabadvezeteki kötések állapotértékelése elsősorban relatíve egyszerűen kivitelezhető feladatnak tűnhet, hiszen az átmeneti ellenállás alapján definiált minőségi tényező számítása nem bonyolult. Az állapotértékelés megvalósításában a mérés technikai kérdések és a körülmények figyelembevétele jelenti a problémát, így méréseimet e kérdések vizsgálatával végzem. A minél pontosabb eredmény érdekében összehasonlítok a 2.1.1 fejezetnek megfelelő és nem megfelelő méréseket.

dátum	helyszín	hőmérséklet [°C]	páratartalom [%]
2021.10.25.	BME NFL	20,5	58
2021.10.26.	BME NFL	19,8	55
2021.10.27.	BME NFL	20,1	55

3.1 Minták adatai

A dolgozat méréseihez ACSR sodronyra újonnan installált, markolóprésses kötésekkel használok. Négy különböző típusú minta adott, mindegyikből egy helyesen felszerelt és több, valamilyen módon helytelenül rögzített darab.

- ALCAN HEPC 721-156

alkalmazás helye	oszlopköz
kötés típusa	markolóprésses összekötő
sodrony	ACSR
sodronyátmérő	28,14 mm
$R_{eq,sodrony}$	33,6 Ω
minták adatai	#1 standard installáció #2 közepén nem krimpelt; homok hozzáadva #3 közepén és a végeken nem krimpelt; homok hozzáadva



5. ábra ALCAN HEPC oszlopközi kötés

- AFL 8130

alkalmazás helye	tartópont
kötés típusa	markolópréses feszítő, leágazóval ellátott rész
sodrony	ACSR
sodronyátmérő	28,14 mm
$R_{eq,sodrony}$	28 Ω
minták adatai	#1 standard installáció #2 standard installáció; homok hozzáadva #3 betéttel ellátott; homok hozzáadva #4 tisztítás és paszta nélküli installáció; 5 hiányzó elemi szál #5 paszta nélküli installáció



6. ábra AFL markolópréses feszítő, leágazóval

- AFL 5130

alkalmazás helye	oszlopköz
kötés típusa	markolópréses feszítő, leágazó nélküli rész
sodrony	ACSR
sodronyátmérő	28,14 mm
$R_{eq,sodrony}$	16,8 Ω
minták adatai	#1 standard installáció #2 paszta nélküli installáció #3 tisztítás és paszta nélküli installáció; betéttel ellátott; nem teljes hosszig betölt sodrony #4 tisztítás és paszta nélküli installáció; betéttel ellátott (réz) #5 tisztítás és paszta nélküli installáció; betéttel ellátott



7. ábra AFL markolópréses feszítő, leágazó nélküli fél

3.2 A mérésekhez használt eszközök

Az átmeneti ellenállás méréséhez egy Megger MOM2 [21] típusú handheld mikroohmmérőt alkalmazok. A műszer adatai a következők:

eszköz neve	MEGGER MOM2 Microohmmeter
mérési módszer	négyszétes mérés, Kelvin-csipeszek
eszköz típusa	handheld (kézi)
mérési tartomány	0,001-1000 mΩ
felbontás	1 - 999 μΩ: 1 μΩ
pontosság	1 - 1999 μΩ: ±1 % o.r. ± 1 digit
mérőáram	0 - 240 A
mérési időtartamok	0,1 s, 0,6 s, 3,0 s

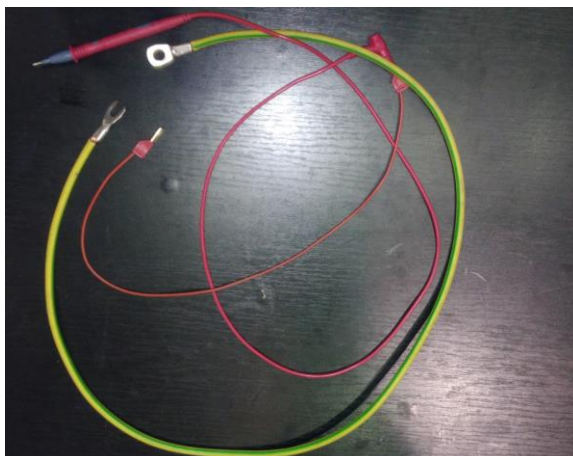
A mérések során módosított elektródelrendezéseket is alkalmazok a 2.1.1 fejezetben taglaltak miatt. A műszer alapértelmezett, mellékelt elektródjai Kelvin-csipeszek, melyek ugyanazon keresztmetszeti síkon valósítják meg az árambetáplálást és a feszültség mérését. Ezt küszöböli ki az alternatív elektródapár, mellyel különválasztottam a két mérést pozíció tekintetében. A feszültség letapogatása egy multiméter tűelektródjával végezhető el, míg a jellemzően ~200 A-es mérőáram továbbításához egy ennél szélesebb keresztmetszetű kábelt alkalmazok. A másik Kelvin-csipeszt nem emeltem ki az elrendezésből, lévén, hogy ott nem szükséges a szétválasztás. Ezzel mind a pozíciót illető követelmények kielégíthetők, mind az esetleges sodronyfelületen jelen lévő egyenetlen eloszlású degradáció figyelembe vehető. A mérések többségét az eredeti műszerrel és a módosított elrendezéssel is elvégeztem az összehasonlíthatóság szempontjából.

- Kelvin-csipeszek:



8. ábra MEGGER MOM2 műszer eredeti elektródjai

- alternatív elektródpár:



9. ábra MEGGER MOM2 műszerhez módosított elektródpár

A Nagyfeszültségű Laboratórium vezetőképes talaja miatt az ettől való villamos elszigetelést KöF FAM munkálatokhoz használatos szigetelő lepleket használtam. A hosszúságok méréséhez fém mérőszalagot használtam.

A mérések során folyamatosan ellenőriztem a kötések hőmérsékletét egy Fluke thermokamerával, de az a vártnak megfelelően nem növekedett, hiszen a $\mu\Omega$ -os nagyságrendű ellenálláson a mérőáram (0,6 s-os beállítással) nem produkál kellő mennyiségű Joule-hőt.

3.3 Szennyeződés hatása

Ebben a vizsgálatban két helyesen installált mintát hasonlítok össze, melyek közül az egyiket homokkal szennyezték a meghúzás előtt. Az előzetes várakozás alapján ez kimutatható ellenállás-növekedést kell, hogy okozzon.

eredeti elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 8130 #1	19	0	0,679
AFL 8130 #2	28,6	5,2	1,021

módosított elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 8130 #1	22,3	9	0,796
AFL 8130 #2	34,1	14	1,218

A különbség mindkét mérési elrendezéssel kimutatható, de a módosított változat egyértelműsíti a nem kielégítő kondíciót, melyre az 1,218-as k-érték utal. Ez a kondíció ugyan nem jelent sürgősen megoldandó problémát, de egy éven belül újbóli ellenállásmérés ajánlott [10].

3.4 Nem megfelelő előkészítés hatása

3.4.1 Paszta hiánya

Következő vizsgálatomban első felében egy helyesen installált kötést hasonlítok össze ez olyannal, amelybe bár tisztított felületű sodronyt helyeztek, az érintkező felületre nem került fel dezoxipaszta. Az előzetes várakozás szerint legfeljebb enyhe eltérés jelentkezhet, a jelenlegi szabványok nem teszik kötelezővé a paszta használatát, gyártói ajánlás szerint van használatban.

eredeti elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 8130 #1	19	0	0,679
AFL 8130 #5	21	0	0,750

módosított elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 8130 #1	22,3	9	0,796
AFL 8130 #5	22,8	7	0,814

Az eredeti elrendezéssel is mindössze 2 $\mu\Omega$ különbséget mérni, azonban a pontosabb mérési elrendezés eredményei már hibahatáron belül vannak, valóban nem észlelhető szignifikáns, egyértelmű ellenálláskülönbség.

3.4.2 Félig inzertált sodrony

A vizsgálat második felében pedig egy szintén helytelen kötésrögzítés hatását mutatom be: a #3 számú AFL 5130 típusú markolóprésses feszítőbe csak félig helyezték be a sodronyt, és utána történt a meghúzás. Az előzetes várakozás szerint ennek a hibának egyértelműen kimutathatónak kell lennie.

eredeti elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 5130 #1	11	0	0,655
AFL 5130 #3	10,8	4	0,643

módosított elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 5130 #1	12,6	11	0,750
AFL 5130 #3	14,2	18	0,845

Az eredmények tanúsága szerint nagyon enyhe, 1 $\mu\Omega$ alatti különbség jelentkezik a hibahatárok figyelembevételével, azonban a műszer ± 1 digités leolvasási hibájával már ez is eltűnik. Bár ez a helytelen installációs lépés villamos hibát nem okozott, mechanikai szempontból nem lesz megfelelő a kötés működése. Ellenállásméréssel történő állapotértékeléssel erre a jelenségre nem lehet következtetni, azonban hosszabb ideig való használat után a kötés integritás megromolhat, és vele együtt az ellenállás is.

3.5 Különböző meghúzási módok hatása

3.5.1 Meghúzás réz összefogó rézbetéttel

Az első összehasonlításban egy standard módon installált mintadarabot és egy rézbetéttel ellátott elkészített kötetet vizsgáltam. A jelenlegi ajánlások szerint ez inkább középfeszültségű földkábeleknél használatos, de bármilyen több elemi szálból álló sodrony végződésénél kivitelezhető a betéttel való összefogatás. Az előzetes várakozás szerint nem szabad érdemi eltérésnek jelentkeznie a két változat között.

eredeti elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 5130 #1	11	0	0,655
AFL 5130 #4	10	0	0,595

módosított elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 5130 #1	12,6	11	0,750
AFL 5130 #4	11	7	0,655

A rézbetét elhelyezésével a névleges ellenállásérték még csökkent is mindkét elrendezés esetén, de ismét hibahatáron belül van az eltérés, így kijelenthető, hogy nem módosítja a kötés villamos állapotát.

3.5.2 Befejezetlen meghúzás

A második összehasonlítás három különböző meghúzási móddal installált markolópréses összekötőt hasonlít össze. Az #1 számú minta ebben a kötéstípusban is a standard installációt jelöli (felületi tisztítás, dezoxipaszta alkalmazása), a teljes kötés hosszán végig meghúzva azt. A #2 számú mintánál a kötés közepe, míg a #3 számúnál a kötés közepe és végei krimpeltlenek.

eredeti elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
ALCAN HEPC 721-156 #1	21	0	0,625
ALCAN HEPC 721-156 #2	22	6	0,655
ALCAN HEPC 721-156 #3	23,2	2	0,690

módosított elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
ALCAN HEPC 721-156 #1	25	7	0,744
ALCAN HEPC 721-156 #2	25,9	14	0,771
ALCAN HEPC 721-156 #3	27,4	11	0,815

Mindkét elrendezés növekvő tendenciát mutat ellenállás szempontjából a minél kevesebb felületen történő meghúzás irányába, mely a hibahatárok figyelembevételével természetesen nem jelenthető ki egyértelműen. Azonban a kisebb mértékű egybefüggő alumíniumtömb miatt egyértelműen rosszabb vezetőképesség és integritás adódik a helytelenül meghúzott kötésekre. Továbbá a magas szórást több, az átlagtól felfelé eltérő érték okozta a #2 és #3 számú mintáknál, de valószínűsíthető, hogy hosszabb használatot követően jelentősen romolhat a kötések átmeneti ellenállása.

3.6 Hiányzó vagy sérült sodronyszálak hatása

Negyedik mérésemben egy komolyabb sérüléssel rendelkező markolópréses feszítőt hasonlítok össze egy helyesen installált, ép mintadarabbal. A #4 számú kötésből a bemeneti pontnál 5 cm hosszán öt, egymás melletti elemi szál hiányzik. Az előzetes várakozás szerint markáns különbségnek kell jelentkeznie az ellenállásban.

eredeti elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 8130 #1	19	0	0,679
AFL 8130 #4	39,6	7	1,414

módosított elrendezés	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 8130 #1	22,3	9	0,796
AFL 8130 #4	39	22	1,393

A mért eredmények elrendezéstől függetlenül megfelelnek a várakozásnak. A k-érték is egyértelműen jelzi a nem kielégítő kondíciót. A hiányzó sodronyszálak kisebb keresztmetszetet jelentenek, ezáltal szűkítve az áramutat.

3.7 Húzóerő megváltozásának hatása

Utolsó vizsgálatom során két, korábban már vizsgált markolóprésses feszítőt (#1: hiba nélküli kötés, #4 hiányzó sodronyszálak) hasonlítok össze, ezúttal mechanikai terheléssel és anélkül. Mind a két mérést a módosított elektródelrendezéssel mértem.

A mérés során a kötés szemét hevederrel rögzítettem a Nagyfeszültségű Laboratórium darujához, majd a kötés sodronyát egy Briganti gyártmányú sodronymegfogóval rögzítettem a terhelést jelentő súlyhoz. Ez a súly egy 400 kg össztömegű KöF-KiF transzformátor volt, hevederrel és egy bilinccsel rögzítve a megfogóhoz. Ezt követően megemelttem 5 cm-rel a talaj fölé a terhelést.

Az előzetes várakozás szerint a jó állapotban lévő kötéseknek jelentősen nem módosulhat az átmeneti ellenállása, azonban helytelenül installált, sérült kötéseknel megjelenhet ellenállás-növekedés: a terhelés hatására megfeszülő és összehúzódó sodrony miatt több szűkületi pont és rés hatása érvényesülhet.



10. ábra A terheléses méréshez használt sodronymegfogó

módosított elrendezés, terheletlen eset	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 8130 #1	22,3	9	0,796
AFL 8130 #4	39	22	1,393

módosított elrendezés, terhelt eset	ellenállás [$\mu\Omega$]	szórás [%]	k-érték
AFL 8130 #1	25	8	0,893
AFL 8130 #4	55,2	18	1,973

Az eredmények megfelelnek az elvártaknak, az #1 számú minta ellenállása minimálisan emelkedett, állapota továbbra is teljes mértékben kielégítő. A #4 számú mintánál igazolódott a feltevés: bár nagy szórással, de teljesen egyértelműen kimutatja az eredmény a meghibásodást.

4 Következtetések

A 3. fejezet vizsgálati eredményeit, és az összegyűjtött elméleti ismereteket figyelembe véve az alábbi következtetésekre jutottam:

- A módosított mérési elrendezés egyértelműen nagyobb szórását a kézi erővel a sodronyhoz nyomott, feszültségméréshez használt elektród okozhatja. A hagyományos Kelvin-csipesz állandó nyomóerővel rendelkezik, és a mérések során folyamatosan alacsony szórást produkált.
- A módosított elrendezés az összes mérés során magasabb ellenállást mért, mely annak köszönhető, hogy a feszültségmérési pont (mely megegyezett a Kelvin-csipesz megfelelő pontjával) mögött helyezkedett el az áramot betápláló elektród: az áram ezt az utat megtéve kiegyenlítődt az egyes sodronyszálak között, így a feszültségmérési ponton már egy kisebb áramerősség által létrehozott potenciál volt érzékelhető. Tehát több elemi szálból álló sodronyokra rögzített, markolópréses kötésekhez mindenképpen érdemes olyan ellenállásmérőt tervezni, amelynek szétválasztott a feszültség- és árammérő elektródja.
- Bár a módosított ellenállásméréssel a hibahatárokat figyelembe véve nem tekinthető különbözőnek néhány eredmény. Azonban összehasonlítva az eredeti elrendezés eredményeivel, olyan trendek figyelhetőek meg, ami a fizikai háttérrel egybevág. A módosított elrendezés pontosságának javításával ez kiküszöbölhető lenne.
- Bizonyos körülményekről (szennyeződés bejutása a kötésbe, installáció előtti hiányos előkészítés, befejezetlen meghúzás) bár ismert, hogy hozzájárulnak egy kötés villamos minőségének leromlásához, nem feltétlenül okoznak olyan növekedést, hogy az jelentős vagy cserét indikáló legyen. Azonban ez nem zárja ki azt, hogy ezek a kötések a felhelyezést és folyamatos használatot követően ne öregedjenek gyorsabban.
- A sodronyon, a kötés közelében található sérülés jelentősen lerontja a kötés átmeneti ellenállását. Bár ez egy egyértelműen megmérhető ellenállás-

növekedés, fontos figyelembe venni, hogy a sodrony mechanikai feszítése nélkül jóval alacsonyabb érték észlelhető: ez laboratóriumi mérések során figyelembe veendő. További meghibásodások terheléses vizsgálata is ajánlott, ellenőrizendő, hogy mely jelenségeknél szükséges ezt szem előtt tartani.

- Bár egy 2.0 körüli ellenállásérték pár hónapon belüli cserét indikál egy kötésnél, infravörös tartományban ez még mindig rejtve maradhat számos befolyásoló tényező miatt. A thermovíziós megoldásokra való hagyatkozás elhalaszthatja a szabadvezetési hálózaton fellépő problémák egy részét.

5 Összegzés

A 2020. évi TDK-ra készült kutatómunkám irányvonalát folytatva, dolgozatomban kiemeltem a legfontosabb mérés technikai kérdéseket a szabadvezetékeken használt markolóprésses kötésekkel illetően, hiszen ez több ezek több szempontból is kritikus pontot jelentenek a nagyfeszültségű szabadvezeték állapotértékelés szempontjából. Részletes összefoglalást készítettem a FAM módszerrel való megoldásokról hibás kötések esetére. A továbbiakban a szabadvezeték állapotértékelés egyik leghatékonyabb lehetőségéről, a pilóta nélküli repülő eszközökről írtam, és ezeket összehasonlítottam a sodronyon haladó robottechnológiákkal.

Dolgozatom gyakorlati része a BME Nagyfeszültségű Laboratóriumban végzett kötésvizsgálatokat ölel fel, számos különböző méréssel, úgy, mint a szennyeződések vagy helytelen installáció észlelhetősége, az előkészítés hiányának hatása vagy sérült sodronyszálak a kötés átmeneti ellenállásra gyakorolt terheléses, illetve terhelés nélküli behatása. Igazolható, hogy az ellenállásméréshez használt módosított elektródarendezéssel pontosabban mérhető meg a szabadvezeték kötések átmeneti ellenállása. Méréseim alapján a kötések degradációs mechanizmusai közül a szennyeződések jelenléte és a sodrony elemi szálainak sérülései kimutathatóak, míg a helytelen lépésekkel végzett installáció különböző formáinak kimutatása a dolgozatban bemutatott módszerrel nem sikerült.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti a BME Nagyfeszültségű Laboratóriumának több dolgozóját, név szerint Dr. Németh Bálintot, a laboratórium vezetőjét, aki a mérések idejére biztosította a szükséges berendezéseket; Meszes József műszaki munkatársat, aki készséggel segített a mérésekben; valamint Meixner József mérnök urat, aki idejét nem kímélve segített a terheléses mérés kivitelezésében, valamint szakértelmével és tapasztalatával hozzájárult a dolgozathoz.

És végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni konzulensem, Dr. Cselkó Richárd munkáját, akihez folyamatosan tudtam fordulni segítségért kutatómunkám során.

Ábrajegyzék

1. ábra Nagyfeszültségű sodronyon használt markolópréses feszítő	9
2. ábra 400 kV-os szabadvezeték egy drónnal készített légifelvételen.....	11
3. ábra AIR6 Systems Wiris 8	13
4. ábra Kinectrics LineVue	16
5. ábra ALCAN HEPC oszlopközi kötés.....	17
6. ábra AFL markolópréses feszítő, leágazóval.....	18
7. ábra AFL markolópréses feszítő, leágazó nélküli fél	18
8. ábra MEGGER MOM2 műszer eredeti elektródjai	19
9. ábra MEGGER MOM2 műszerhez módosított elektródpár	20
10. ábra A terheléses méréshez használt sodronymegfogó.....	24

Irodalomjegyzék

- [1] *Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration*, European Commission, 2020
- [2] ISO 55001:2014 *Asset management – Management systems – Requirements*, 2014
- [3] Gyergyádesz László: *Szabadvezetéki szerelvények diagnosztikai vizsgálata átmenetiellenállás-méréssel*, TDK dolgozat, 2020
- [4] Gyergyádesz László, Dr. Cselkó Richárd: *Drón alapú légi felvételek elemzése jellemzőszabadvezetéki hibák automatikusfelderítésére*, Elektrotechnika 2021/03, 2021
- [5] Hildmann, C., Schlegel, S., Großmann, S., Schmidt, C.: *Measuring Joint Resistances of Power Connections with Stranded Conductors – Fundamentals, Principles and Common Reasons for Measurement Errors*, 2019
- [6] IEC 61284:1997, *Overhead lines – Requirements and tests for fittings*, 1997
- [7] *Preformed Line Products: Transmission Line Repair Manual – A guidebook for the inspection and repair of damaged and worn conductors*, 2017
- [8] Konstantin O. Papailiou: *Springer Handbook of Power Systems*, ISBN: 978-981-9937-5, 2021
- [9] Joe Renowden: *Do you know the condition of your splices?*, 2012
- [10] John Snell, Joe Renowden: *Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines*, IEEE ESMO 2000, Paper 38C-TPC 17, 2000
- [11] Comte, C., Lacasse, R.: *Applicability of resistance and temperature measurements for the characterization of full tension compression splices*, 2003
- [12] Mirallès, F., Hamelin, P., Lambert, G., Lavoie, S., Pouliot, N., Montfrond, M., Montambault, S.: *LineDrone Technology: Landing an unmanned aerial vehicle on a power line*, 2018
- [13] DJI Matrice 210 RTK Specifications, <https://www.dji.com/hu/matrice-200-series/info#specs>
- [14] Altura Zenith ATX8 Specifications, https://www.aerialtronics.com/downloads/EN-Specsheet_aerialtronics-AlturaZenith_ATX8_16.06.2017.pdf
- [15] AIR6 Systems Wiris 8, <https://www.air6systems.com/products/>

- [16] Nguyen P., Dudkin S., Kong C.: *Automatic diagnostic o transmission lines based on ultraviolet inspection*, 2019
- [17] Sodronyhúzás a Duna felett drónnal, <https://go2fly.hu/dron-segiti-az-epulo-tavvezetek-sodronyainak-duna-feletti-athuzasat/>
- [18] Kinectrics LineVue Introduction Video, <https://youtu.be/eSIhXJqgl6k>
- [19] Debenest, P., Guarnieri, M., Takita, K., Fukushima, F., Hirose, S., Tamura, K., Kimura, A., Kubokawa, H., Iwama, N., Shiga, F.: *Expliner – Robot for inspection of transmission lines*. Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008.
- [20] Hydro Québec LineScout, <https://www.hydroquebec.com/robotics>
- [21] Megger MOM2 Microohmmeter Datasheet, <https://www.megger.com/hand-held-200-a-micro-ohmmeter-mom2>

Az internetes forrásokra mutató linkek utolsó ellenőrzési időpontja: 2021.10.28.